

Tallinna Tehnikaülikooli Tartu Kolledž

Keskkonnakaitse õppetool

**PUUTUHA KASUTAMINE LISAVÄETISENA
AKVAPOONILISES SÜSTEEMIS**

Magistritöö tööstusökoloogia erialal

Rinaldo Rüütli

Juhendajad: MSc Sander Kutti

MSc Heiki Jaanuska (EMÜ)

Tartu 2015

Sisukord

Sissejuhatus	2
1. Akvapooniline süsteem	3
1.1. Hüdroponika	3
1.1.1. Taimede mineraalne toitumine	3
1.1.2. Hüdroponiline süsteem	4
1.1.3. Katmikalad Eestis	8
1.2. Vesiviljelus ehk akvakultuur	9
1.2.1. Vesiviljelus Eestis	13
1.3. Akvapoonilised lahendused	14
1.3.1. Taimede toitumine akvapoonikas	16
1.3.2. Kaaliumi omastamine ja roll taimes	17
1.4. Toitainevaegus	18
1.5. Süsteemi olulised parameetrid	21
1.5.1. pH tase	21
1.5.2. Söötmine ja lisatoitained	22
1.5.3. Elektrijuhtivus	24
1.5.4. Hapnikusisaldus	24
1.5.5. Temperatuur	25
1.5.6. Taimede kastmise intervallid ja hüdrauliline koormus	25
2. Materjal ja metoodika	26
2.1. Katse ülesehitus ja katseseade	26
2.2. Süsteemi hooldamine ja veeproovide võtmine	27
2.3. I katse ehk kontrollkatse	28
2.4. II katse puutuhaga	30

2.5. Analüüsid	31
3. Tulemused	33
3.1. Veeanalüüsid	33
3.2. Taimed	34
3.3. Kalad	38
4. Arutelu	39
Kokkuvõte	43
Summary	44
Kasutatud kirjandus	46

Autorideklaratsioon

Deklareerin, et käesolev magistritöö, mis on minu iseseisva töö tulemus, on esitatud Tallinna Tehnikaülikooli magistrikraadi taotlemiseks ja et selle alusel ei ole varem taotletud akadeemilist kraadi.

Kõik töö koostamisel kasutatud teiste autorite tööd, olulised seisukohad, kirjandusallikatest ja mujalt pärinevad andmed on viidatud.

.....

Kuupäev

.....

Allkiri

Sissejuhatus

Hüdroponika ja vee korduvkasutusega vesiviljelus on tõhusad meetodid, mis võimaldavad taimi ja kalu kasvatada kontrollitud tingimustes. Saak on kvaliteetne ning tagatud on toodangu stabiilsus, sest see on paremini planeeritav. Akvapoonika ühendab need kaks meetodit ning võimaldab anda korraga nii taimset kui ka loomset toodangut. Taimede ja kalade elutegevuse sidumisel esinevad mõned probleemid toitainete osas, sest nende organismide vajadused on erinevad, seetõttu on taimede korraliku kasvu tagamiseks vaja süsteemi lisada täiendavaid toitaineid. Üheks selliseks toitaineks on kaalium. Tavapäraselt kasutatakse selle täiendamiseks puhtal kujul erinevaid kaaliumisooli. Akvapooniline süsteem on looduslähedane süsteem, sest jäljendab looduses esinevat toitainete ringlust ning selliste mineraalsete soolade lisamine on seotud pigem hüdroponikaga. Seega üritatakse käesolevas töös kasutada lisaväetisena puutuhka, mis on teada-tuntud kaaliumväetis ning milles sisalduvad soolad on looduslikku päritolu.

Käesoleva magistritöö eesmärgiks on välja selgitada, kas on võimalik kasutada puutuhka lisaväetisena ning kuidas see mõjutab salatitaimede kasvu ning nende kvaliteeti akvapoonilises süsteemis. Hüpoteesi kontrollimiseks viidi läbi kaks salatitaimede kasvatamise katset akvapoonilises süsteemis. Esimene katse oli kontrollkatse, mille suhtes võrreldi tulemusi ning teine katse on hüpoteesi tõestamiseks, kus lisati süsteemi vette puutuhka kui lisaväetist. Katsete lõpus mõõdeti taimede mass ning määrati osaline keemiline koostis. Täiendava võrdlusena kasutatakse hüdroponilises süsteemis kasvatatud taimi.

Hüpotees on, et puutuhha lisamine akvapoonilisse süsteemi suurendab taimede kasvu ning kaaliumisisaldust taimes, sest tuhk on kaaliumirikas väetis.

1. Akvapooniline süsteem

1.1. Hüdroponika

1.1.1. Taimede mineraalne toitumine

Taimed on autotroofid, mis tähendab, et nad omastavad keskkonnast anorgaanilisi toitaineid ning klorofüllil abil sünteesivad need orgaanilisteks ühenditeks. Toitaineid võib taim omastada nii juurte kui lehtede kaudu. Juurte kaudu omastab taim vett, hapnikku ja vees lahustunud või asenduvalt neeldunud mineraalaineid ning vähemal määral ka orgaanilisi aineid (nt humiinhapped). Lehtede kaudu omastab taim eelkõige süsihappegaasi, vähemal määral vett, hapnikku ja lahustunud mineraalseid ja orgaanilisi ühendeid. Juurte kaudu omastatavad ained saab taim tavaliselt mullast. Lisaks aitab muld ka taime kinni hoida ja toetada. (Kärblane, 1996)

Taimedel, mida kasvatatakse hüdroponikas (ka akvapoonikas), ei ole füsioloogilist erinevust võrreldes nendega, mida kasvatatakse mullas. Hüdroponika hõlmab endas taimede kasvatamist mineraalses toitainelahuses ilma mullata. Vahel kasutatakse taimede toetamiseks erinevaid, peamiselt anorgaanilisi substraate. (Jones, 2005) Mullas olevaid suuri orgaanilisi ühendeid, mis moodustavad huumuse, ei suuda taim omastada. Need peavad enne lagunema mineraalseteks elementideks. Taim suudab neid omastada, kui elementide ioonid puutuvad kokku rakumembraanidega. Seega ei anna orgaaniline aiapidamine taimedele elemente, mida ei ole hüdroponikas. Orgaanilise aine roll on tagada taimedele mineraalaineid ning säilitada selline mulla struktuur, mis teeb need ained taimedele kättesaadavaks. (Resh 2004)

Looduslikke elemente on kokku 92, kuid taimedest on leitud nendest vaid 60. Nendest omakorda on taimedele eluks vajalikud ainult 16. Need on liigitatud makroelementideks, mida on taimel vaja suhteliselt suurtes kogustes, ning mikroelementideks, mida on vaja väikestes kogustes. Makroelemendid on vesinik (H), süsinik (C), hapnik (O), lämmastik (N), kaalium (K), kaltsium (Ca), magneesium (Mg), fosfor (P) ja väävel (S). Mikroelemendid on kloor (Cl), boor (B), raud (Fe), mangaan (Mn), tsink (Zn), vask (Cu) ja molübdeen (Mo). Ülejäänud elemente võivad taimed omastada, kuid need ei tarvitse omada positiivset mõju taimedele, vaid võivad olla hoopis mürgised. On leitud, et räni (Si), nikkel (Ni), alumiinium (Al), koobalt (Co), vanaadium (V), seleen (Se) ja

plaatina (Pt) on sellised elemendid, mida taimed samuti omastavad ja kasutavad kasvamiseks. (Rakocy *et al*, 2006)

Traditsioonilises taimekasvatuses saavad taimed oma toitained kätte mullast. Mineraalsete soolade vees lahustamisel dissotseeruvad need ionideks, mis on taimedele kättesaadavad mullalahusest või mulla kolloididelt. Katioone (nt K^+ , Ca^{2+}) omastavad taimed peamiselt kolloidosakestelt, anioone (nt Cl^- , SO_4^{2-}) aga mullalahusest. Mullalahus on taimede jaoks kõige olulisem toitainete allikas. Ioonide liikumist mullalahusest läbi taime rakumembraanide mõjutab elektrilise ning keemilise potentsiaali (osmootne rõhk) erinevus, mis on rakumembraani ühel ja teisel pool. Kui potentsiaal on suurem rakust väljas, siis toimub osakeste sissevool. Sissevool võib toimuda ka siis, kui potentsiaal on raku sees suurem, kuid sel juhul peab taim kulutama energiat, et see ületada. (Resh, 2004)

1.1.2. Hüdroponiline süsteem

Kuna taimele piisab toitumiseks mineraalsetest elementidest, siis ei lisata toitainelahustesse orgaanilisi ühendeid. Üks tuntumaid toitainelahuseid, mis tugineb taimede mineraalse toitumise teooriale, on Hoaglandi lahus aastast 1933, mida on hiljem edasi arendatud. Lahuseid on väga palju erinevaid olenevalt taimeliigist, mida soovitakse kasvatada, kuid elementide sisaldused jäävad teatud soovituslikesse vahemikesse (Tabel 1). Kõige rohkem on lahuses kaaliumi, kaltsiumi ja nitraate. (Resh, 2004)

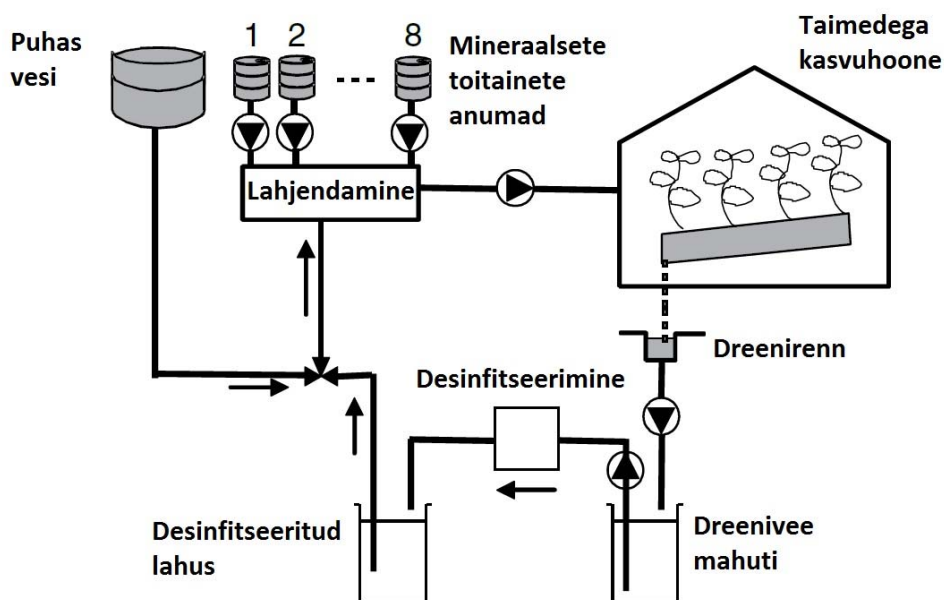
Tabel 1. Toitainelahuse koostis (Molyneux, 1988)

Element	Miinumum	Optimum	Element	Miinumum	Optimum
Nitrat-N (NO_3^-)	50	150-200	Boor (B)	0,1	0,3-0,5
Fosfor (P)	20	50	Raud (Fe)	3,0	6,0
Kaalium (K)	50	300-500	Mangaan	0,05	1,0
Kaltsium (Ca)	125	150-300	Vask (Cu)	0,05	0,1
Magneesium	25	50	Tsink (Zn)	0,05	0,1
Väävel (S)	0,2	0,2-0,5	Molübdeen	0,01	0,05

Sõltuvalt hüdroponilise süsteemi ülesehitusest võidakse toitainelahust perioodiliselt täiendada, kui taimed on suure osa sellest ära tarbinud. Sellisel juhul on tegemist tsirkuleeriva süsteemiga, kus kasutatud lahus liigub tagasi mahutisse ning sealt uuesti taimedeni. Sellise lahenduse puhul on

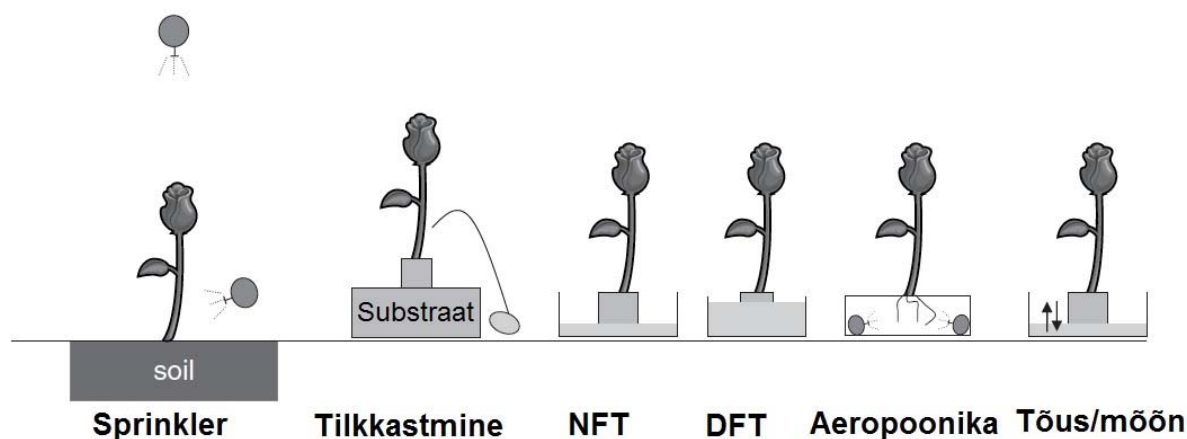
veekulu madal, kuid lahus tuleb tavaliselt 2-3 nädala tagant ikkagi välja vahetada, ühtegi lahust ei tohiks kasutada kauem kui kolm kuud ilma seda täielikult välja vahetamata. Põhjuseks on asjaolu, et olenevalt keskkonnamitingimustest, taime liigist ning kasvufaasist, omastavad taimed toitaineid lahusest erinevalt. Seega võib tekkida mõnede elementide puudus ning teiste kuhjumine. Toitainelahuse koostist saab kindlaks määrata ainult laboris, mis oleks liiga kulukas. Seetõttu on otstarbekas lahus regulaarselt välja vahetada. Kui kasutatud toitainelahus iga kord kanaliseerida ja taimedeni juhtida pidevalt värske lahus, on veekulu küll suur, kuid lahust on kergem valmistada ning alati on tagatud elementide õiged kontsentratsioonid ja vahekord. Lisaks toitainetele tuleb lahusesse lisada täiendavalt ka vett, sest taimed omastavad seda palju rohkem ja kiiremini kui mineraalseid toitaineid. Kiire vee omastamise tõttu suureneb soolade kontsentratsioon vees ning võib taimedele mõjuda kahjulikult. Päevane vee kadu võib olenevalt süsteemist ja taimedest olla 5-30%. (Resh, 2004)

Tsirkuleeriva hüdroponilise süsteemi põhikomponentide hulka kuuluvad (Joonis 1): kasvuhoone, kus kasvavad taimed, desinfitseerimisvõrk, mineraalsete toitainete mahutid, puhta vee allikas ning segamissõlm. Lisaks asuvad süsteemis mitmed kogumismahutid, pumbad ning automaatika. Sobiv toitainelahus segatakse kokku segamissõlmes, kus kontsentreeritud toitainelahust lahjendatakse puhta vee ning kasvuhoonest tagasivoolava lahusega. (Raviv, 2008)



Joonis 1. Tsirkuleeriva hüdroponilise süsteemi ülesehitus (Raviv, 2008)

Hüdroponilised süsteemid erinevad üksteisest peamiselt kastmismeetodite poolest. Kastmisega antakse taimedele lisaks veele ka toitained (ing keeles *fertigation*). Kastmine võib toimuda taime kohalt, pealtpoolt juuri või altpoolt juuri (Joonis 2). (Raviv, 2008)



Joonis 2. Erinevad kastmisviisid (Raviv, 2008)

Igal meetodil on omad plussid ja miinused. Hüdroponikas on kõige rohkem kasutatavad süsteemid tilkkastmine, NFT ja DFT. Eestis on köögiviljade kasvatamiseks kasutusel nendest kaks esimest.

Sprinklersüsteemi puhul kastetakse taimi pealtpoolt pihustite abil. Selle süsteemi eeliseks on suhteliselt madal hind võrreldes teistega. See on kõige levinum kastmisviis, mida kasutatakse välitingimustes konteinertaimede kasvatamiseks. Taimed peavad asuma tihedalt üksteise kõrval, et kastmislahust ei läheks raisku.

Tilkkastmine on kõige levinum meetod, mida kasutatakse kasvahoonepõhistes hüdroponilistes süsteemides. Toitainelahus juhitakse iga taime juurde eraldi peenikese vooliku kaudu. Taimed asuvad substraadi sees (nt kivivill) Selle meetodi korral saab kasutada küllaltki suurt survet, mis võimaldab tagada ühesuguse toitainelahuse koguse jõudmise taimeni.

NFT (*Nutrient film technique* e. toitainekiletehnika) süsteemis (Joonis 2 ja 3) kasvavad taimed väikeste pottide sees kaldus rennides (0,3-2% kalle), mida mööda liigub toitainelahus. Lahus pumbatakse kanalisse ning taimed omastavad juurte abil sellest toitaineid. Taimede juured peavad olema kogu aeg niisked, kuid toitainelahusest peaks juurtele moodustuma võimalikult õhuke kiht. Salatitaimede jaoks on piisav 4-8 cm laiune renn. Ideaalne vooluhulk salatitaimede jaoks on 3-8 l/m²/h. Esialgu oli NFT hea odav lahendus, sest polnud vaja kasutada substraati. Tänapäeval on

aga selle süsteemi probleemsed kohad puhverdusvõime puudumine ja võimalikud taimehaiguste puhangud, mis levivad juurte kaudu. NFT süsteemi kasutatakse peamiselt salati ja maitsetaimede kasvatamiseks. (Jones, 2005; Raviv, 2008)

DFT (*Deep flow technique* e. süvavoolutehnika) süsteem koosneb suurtest vannidest, kus on toitainelahus ning mille peal ujuvad polüstüreenitahvlite sees taimed. Taimede juured ulatuvad 5-15 cm sügavusse toitainelahusesse. Toitainelahus ringleb toitainemahuti kaudu, kus seda õhutatakse ja jahutatakse. Kuna lahuse kogus on suur, siis on süsteemil suur puhverdusvõime nii toitainete kui temperatuuri osas. (Jones, 2005; Raviv, 2008)

Aeropoonika kastmissüsteemi puhul asuvad taimed polüstüreenitahvlite peal vannide kohal nagu DFT süsteemis, kuid taime juured ei ulatu vette. Selle asemel neid piserdatakse altpoolt toitainelahusega. Juurte ümber on õhuniiskus 100% ning hapnikusisaldus on väga kõrge. Nagu NFT puhul on selle süsteemi miinuseks madal puhverdusvõime. (Jones, 2005; Raviv, 2008)

Tõus ja mõõn süsteemi puhul asuvad taimed substraadiga pottides madalates vannides või põrandal. Kastmise ajal tõuseb veetase vannis või põrandal nii, et pottide alumine osa jääb täielikult toitainelahuse sisse. Kastmine peab kestma piisavalt kaua, et lahus suudaks substraadi kaudu liikuda taime juurteni. Peale kastmist peab kogu lahus taimede juurest ära voolama, et ära hoida juurte mädanemine. (Jones, 2005; Raviv, 2008)

Taimede edukaks kasvatamiseks on lisaks mineraalsetele toitainetele vajalik piisav valguse ja süsihappegaasi olemasolu. Kui kasvatada Eestis aastaringselt taimi, siis tuleb neid täiendavalt valgustada, sest talveperioodil jääb loomulikust valgusest väheks. Lisavalgustusel on kaks eesmärki: fotosünteesiline, mis aitab tagada taime normaalset kasvu, ja fotoperioodiline, mis mõjutab taime õitsemist ning taime kuju. Fotosünteesilise mõju saavutamiseks on otstarbekas kasutada valgustust päeva pikendamiseks, mitte päevavalguse võimendamiseks, mille kasutegur on kaheldav. (Jones, 2005)

Valgusallika tüüp võib mõjutada taimede kasvu, kuid sõltuvalt liigist ei pruugi erinevus olla märkimisväärne. Levinumad valgustid, mida kasutatakse, on luminofoorlampid, naatriumlampid ning LED lampid. Katseliselt on leitud, et punaste LED lampide all kasvanud taimede kuivaine mass on madalam kui luminofoorlampide või punaste ja siniste LED lampide all kasvanud taimedel. Punase ja sinise LED lambi all kasvatamine ei mõjuta oluliselt salatitaimede saagikust võrreldes luminofoorlampi all kasvatamisega. Katses, milles võrreldi LED lampide ja naatriumlampide all

kasvatatud lilli, ei leitud olulist erinevust, mis võiks olla majanduslikult tähtis. (Yorio *et al*, 2001; Currey, Lopez, 2013)

Lisaks mineraalsetele toitainetele ja valgusele on taimedele vajalik ka süsihappegaas. Õhus on süsihappegaasi (CO₂) sisaldus taimede jaoks piisav, kuid selle mõningane suurendamine avaldab taimede kasvule positiivset mõju. Taimed tarbivad päevasel ajal CO₂ ning selle sisaldus langeb kasvuhoones. Öösel suureneb see aga taimede hingamise tõttu, muutus võib-olla kuni 150 ppm. CO₂ positiivne efekt on suur, kui selle sisaldus on kasvuhoones kolm kuni neli korda kõrgem kui atmosfääris. Liiga kõrged kontsentratsioonid (üle 2000 ppm) seevastu avaldavad taimedele aga toksilist mõju. Kui CO₂ sisaldus ületab 5000 ppm, siis on see inimestele juba ohtlik. (Jones, 2005)

1.1.3. Katmiklalad Eestis

Eestis kasvatavad katmiklaladel köögivilju aastaringselt ainult kaks ettevõtet. Ülejäänud kasvatajate kasvuhoonetes kasvatatakse köögivilju kuni seitse kuud aastas. Suveperioodil kasvatavad katmikkultuure peamiselt väikese ja keskmise suurusega ettevõtjad, enamik suurettevõtjaid kasvatab neid aga aastaringselt. Selle põhjuseks on Eesti kliima, mis nõuab aastaringseks kasvatamiseks lisavalgustust ja kasvuhoonete kütmist, mis omakorda muudab toodete omahinna kõrgeks. Importköögivilj on aga palju odavam ning välismaised tootjad on seetõttu olulised konkurendid kodumaistele tootjatele (Põllumajandusministeerium, 2015). Seda peegeldab ka katmikköögivilju kasvatavate majapidamiste vähenemine. 2013. a oli neid 813 (sh 30 juriidilist isikut) ning 2014. a 168. Langus on ligi 80% ning selle moodustab eraisikute majapidamiste vähenemine. Suurtootjaid ehk neid, kes kasvatavad katmikköögivilju rohkem kui 0,3 ha suurusel alal, oli 2013. a 21, kellest neli olid juriidilised isikud (Statistikaamet). Aiandussektori arengukavas on seatud eesmärgiks, et katmikköögiviljade kasvupind oleks 2020. aastaks 255 ha (Põllumajandusministeerium, 2015). Eestis on alates 2004. aastast katmikköögivilja kasvupind olnud langustendentsis. Kui 2004. a kasvatati katmikköögivilja 302 hektaril, siis 2014. a oli see näitaja 241 hektarit. Kõige rohkem kasvatatakse kultuurid katmiklaladel 2014. a olid tomat (61% kasvupinnast) ning kurk (27% kasvupinnast). Katmikkurgi saagikus oli 2014. a 72 t/ha ning katmiktomati oma 32 t/ha. Katmikköögiviljade kogusaak oli 2014. a 10839 t. Eesti on köögiviljade osas olnud netoimportija ehk kodumaised tootjad ei suuda katta kogu tarbimist. Perioodil juuli 2013 - juuni 2014 oli Eesti värskete köögiviljade tarbimine 131280 t, samas kui kogusaak oli 78860 t ehk kodumaine tootmine tagab 60% tarbimisest. Viimase 15 aasta jooksul on see näitaja olnud

vahemikus 50-67% (Statistikaamet). Aiandussektori arengukavas on seatud eesmärgiks, et Eesti isevarustatuse tase köögiviljadega 2020. a on 75% ning Eestis kasvatatud köögivilja osatähtsus ostudes on 42%. (Põllumajandusministeerium, 2015)

2012. a Eestis läbi viidud uuringus küsitleti muuhulgas 17 ettevõtet, kes kasvatavad katmikköögivilju. Uuringu tulemustena selgus, et nende ettevõtete katmikköögiviljade saagikus oli 2010. a 179 t/ha ning 2012. a koguni 406 t/ha. Suurem osa vastanutest (64%) kasvatas katmikkultuure kasvusubstraadil. Võib eeldada, et see tähendab hüdroponilist kasvatamist ning see selgitab oluliselt suuremat saagikust võrreldes riikliku statistikaga. Eestis on katmikköögiviljade kasvatajaid oluliselt vähem kui avamaal köögivilja kasvatajaid, kuid nende keskmine müügitulu on neil oluliselt kõrgem. (Civitta, 2014)

Eesti maaelu arengukavas 2014-2020 on muuhulgas eesmärgidena toodud välja tootlikkuse tõstmise. Selle saavutamiseks tuleb teha täiendavaid investeeringuid tootmistehnoloogiate täiustamiseks ja suurendada automatiseerimist. Nimetatud meetmed aitaksid stabiliseerida ja suurendada saagikust ning vähendada käsitsi tehtavat tööd. Samuti suurendaksid need ettevõtete konkurentsivõimet maailmaturul. Nii akvapoonika kui ka hüdroponika on sobilikud tehnoloogiad nende eesmärkide täitmiseks, sest automatiseerimine ja kõrge saagikus on seal olulisel kohal. (Põllumajandusministeerium, 2014)

1.2. Vesiviljelus ehk akvakultuur

Vesiviljelus on teine akvapoonika komponent ja see hõlmab endas veeorganismide kasvatamist. Akvapoonikas kasvatatakse nendest kõige sagedamini kalu. Alates 1950. aastatest on hakatud kasutama traditsioonilise vesiviljeluse kõrval vee korduvkasutusega vesiviljelust (RAS – *Recirculating aquaculture system*). Vesiviljeluses kasvatatakse veeorganisme tavaliselt suurtes tiikides, kuid RASi puhul kasvatatakse neid sisetingimustes suurtes basseinides ja kontrollitud keskkonnas. Veeorganisme saab kasvatada palju suurema asustustihedusega, sest ringlevat vett filtreeritakse ja puhastatakse. Veekulu on tavapärase vesiviljelusega võrreldes tunduvalt madalam. Seega võimaldab RAS hoida kokku olulisel määral vett ning vähendada keskkonnamoormust, mis tekiks toitainerikka vee juhtimisel keskkonda. (Helfrich, 2003)

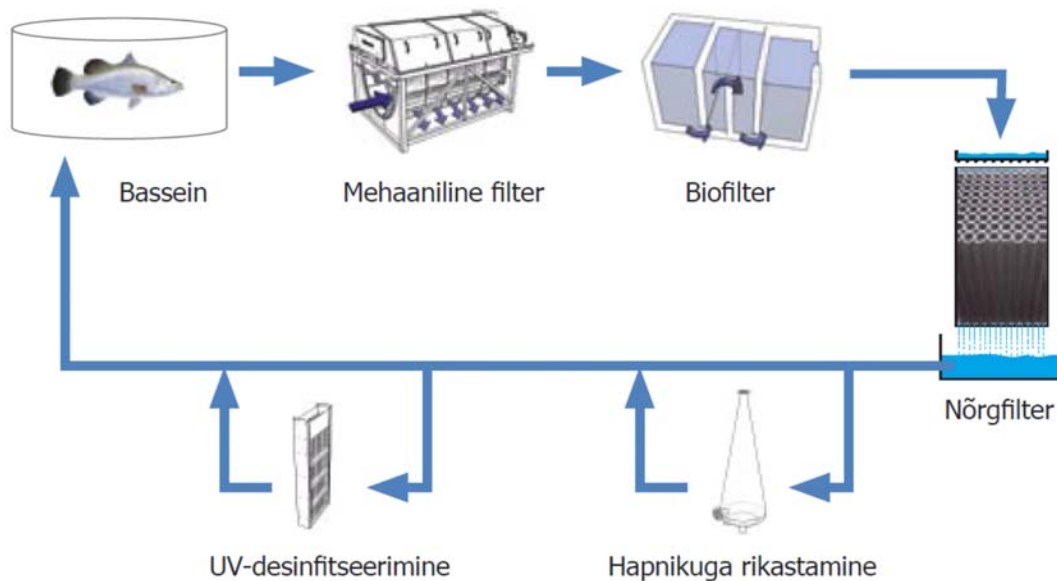
Vesiviljeluses võib kasvatada mitmeid kalaliike. Kalade valiku määrab ära nende vastupidavus tehiskeskkonna tingimustele. Kuna vee maht on sellistes süsteemides väike, on ka selle

puhverdusvõime madal. Kui süsteemis muutub üks parameeter järsult (temperatuur, soolsus, ammooniumi hulk, pH, hapnikusisaldus), võivad kõik kalad hukkuda. Seega peavad valitud kalad olema vastupidavad keskkonnatingimuste kõikumistele. Maailmas kasvatatakse vesiviljeluses kõige rohkem karpkalalasi, tilaapiat, lõhet, forelli, valgeamuuri, pakslaupa (FAO, 2010a; FAO, 2010b). Akvapoonikas sobivad kasutamiseks mitmed sooja- ja külmaveekalad, nagu näiteks tilaapia, lõhe, ahven, triipahven ja arktika paalia. Enamik Põhja-Ameerika kommertslikest akvapoonika süsteemidest kasutavad kalana tilaapiat. Tilaapia on soojavee kala, kes on vastupidav veekeskonna muutuste suhtes. (Diver, 2006)

RASi miinused on kõrge esialgne maksumus ja süsteemi keerukus, sest palju on eri komponente, mida tuleb pidevalt jälgida. Miinuseks on ka ammoniaagi ja süsihappegaasi kõrge sisaldus, mis avaldab kaladele kroonilist kahjulikku mõju, sest nende eemaldamine ei pruugi olla alati efektiivne. (Parker, 2012)

RASi vee kasutamise intensiivsus sõltub sellest, millist lahendust kasutatakse. Kõige intensiivsemad süsteemid on need, mis asuvad hoonetes ning on väliskeskkonnast isoleeritud. Neis tarbitakse 200 liitrit värsket vett ühe kilogrammi kala tootmiseks. Välitingimustes toimivad RAS süsteemid, tarbivad ühe kilogrammi kala kasvatamiseks 3 m³ värsket vett. Need arvud on oluliselt madalamad kui on tavapärasel läbivoolusüsteemiga forellikasvanduses, kus tarbitakse 30 m³ vett ühe kilogrammi kala tootmiseks. Traditsiooniline vesiviljelus sõltub ümbritsevatest keskkonnatingimustest, nagu näiteks temperatuur, hapniku sisaldus, päeva pikkus ja vee puhtus, mis määravad kalade elukeskkonna. RASis kontrollitakse seevastu aga kõiki keskkonna parameetreid ning kaladele tagatakse sobivad olud. See tagab kaladele stressivabad tingimused ning toodang on paremini prognoositav. (Bregnballe, 2010)

Kõikidel RAS-süsteemidel (Joonis 3) on seadmed setete eemaldamiseks, õhustamiseks ja ammooniumi oksüdeerimiseks. Süsteemi põhiosadeks on biofilter, mehaaniline filter, basseinid, õhustajad, puhversüsteemid, steriliseerimiseks vajalikud seadmed, vajadusel kütte- või jahutuselemendid ning valgustus. Kuigi seda on kallim ehitada ja üleval pidada, on sellel siiski palju eeliseid. Ringlev süsteem tagab madalama veekulu (5 korda) ja kõrge saagikuse vee hulga kohta. Efektiivsem sööda tarbimine suurendab samuti tootlikkust. Intensiivne kasvatus nõuab vähem maapinda ja selle saab paigutada juba olemasolevatesse hoonetesse tarbimispiirkonna lähedusse. (Helfrich, 2003; Parker, 2012; Losordo, 1998)



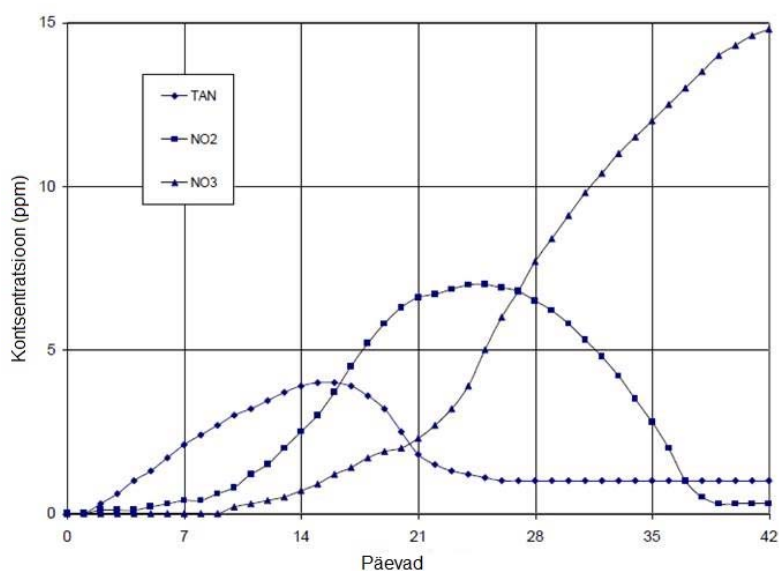
Joonis 3. Vee korduskasutusega süsteemi ülesehitus (Bregnballe, 2010)

Vesiviljeluses söödetakse kaladele granuleeritud sööta, mis sisaldab valku, süsivesikuid, rasvu, mineraale ja vett. See osa söodast, mida kalad ei suuda omastada, eritatakse vette sõnniku kujul. Lisaks eritavad kalad lõpuste kaudu süsihappegaasi ja ammoniaaki (Losordo, 1998). Kalade elutegevuse käigus ja orgaanilise aine (söömata jäänud kalasööt) lagunemise käigus tekkinud (ammonifikatsioon) ammoniakaalne lämmastik (TAN – *total ammonia nitrogen*) võib esineda kas ammoniaagi kujul (NH_3) või ammooniumioonina (NH_4^+). Ammoniaak on kaladele väga mürgine, kuid selle osakaal sõltub vee pHst. TANi sisaldus peaks vees olema võimalikult madal. Kaladel esineb stress ning mõningane suremus, kui TAN on suurem kui 2 mg/l, alates 7 mg/l kasvab kalade suremus märgatavalt (Parker, 2012). NH_3 on kaladele mürgisem ja esineb kõrgema pH korral ning soojemas vees. Selle sisaldus vees ei tohiks ületada 0,05 mg/l. NH_4^+ sisaldus ei tohiks ületada 1 mg/l kohta. (Parker, 2012, Graber, 2008) Karpkalakasvatuse puhul on soovituslik kontsentratsioon isegi alla 0,5 mg/l kohta (Paaver, 2006). Kõrge ammooniumlämmastiku sisaldus võib akvapoonikas suurendada aga taimekasvu fosfaatide parema omastamise tõttu (Rana, 2011).

TANi mürgise mõju leevendamiseks on vesiviljeluses olemas biofilter, mis muudab selle nitraatideks. Biofiltris on bakterid, kes elutsevad substraadi või akvapoonikas ka taimejuurte pinnal biokilena. Nende bakterite tõttu toimub süsteemis nitrifikatsioon ehk ammoniaagi oksüdeerimine nitrititeks ja seejärel nitraatideks. Nitraadid pole kaladele kuigi ohtlikud, kusjuures

mõned veorganismid suudavad taluda seda isegi kontsentratsioonis 100 mg/l. Kõrge nitraadisaldus suurendab taimekasvu ja K^+ , Ca^{2+} ning Mg^{2+} omastamist taimedel. Nitrifikatsiooni vaheproduktina tekkiv nitrit on kaladele mürgine ning selle sisaldus ei tohiks ületada pikaajaliselt 0,5 mg/l. (Parker, 2012)

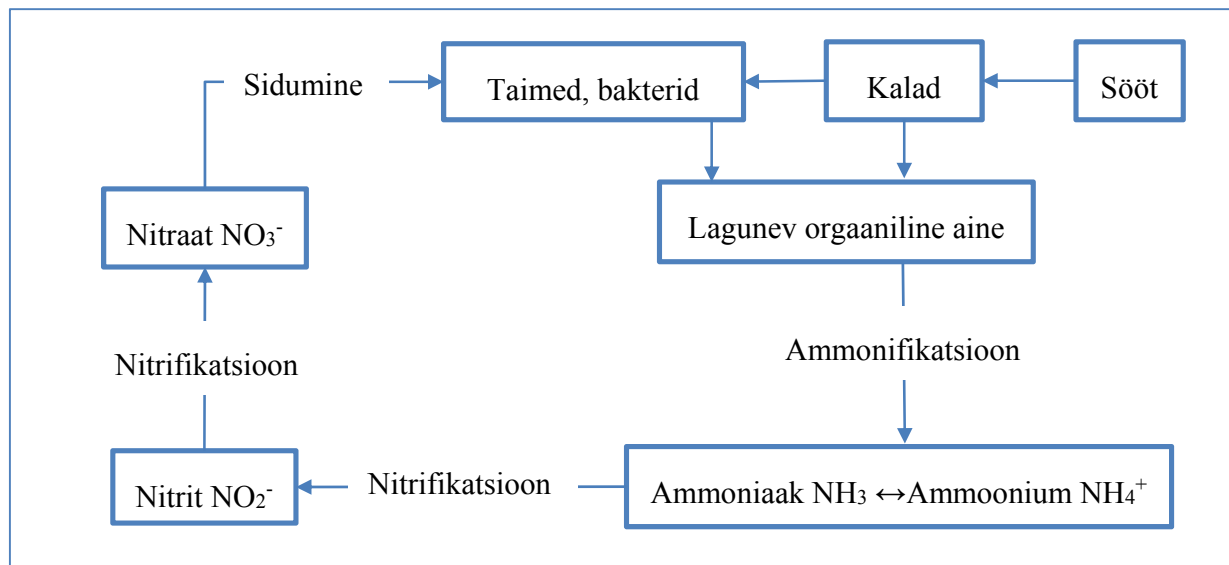
Nitrifikatsioon toimub kahes etapis, millest esimeses muudetakse ammoniaak nitrititeks ning teises faasis nitraatideks. Seda viivad läbi kahte erinevat tüüpi bakterid. Kuna biofilter on elus süsteem, siis selle esialgne käivitamine võtab aega. Alguses ei ole biofiltris kuigi palju baktereid ning ammoniumi tase süsteemis kasvab (Joonis 4). Seejärel hakkavad bakterid seda nitrititeks muundama ning nende tase kasvab, samas kui ammoniaagi tase hakkab langema. Lõpuks hakatakse nitriteid muundama nitraatideks ning nii nitritite kui ka ammoniaagi tase langeb. Kui süsteem on pikka aega toimunud, siis püsivad nii nitritite kui ammoniaagi tasemed nulli lähedal.



Joonis 4. Lämmastikuühendite kontsentratsioonide muutus nitrifikatsiooni algstaadiumis (Timmons, 2002)

Uues süsteemis, kus ei ole veel nitrifitseerivate bakterite hulk suur, võivad tekkida mürgised nitritite kogused. Eriti juhtub see siis, kui lämmastiku allikaks on ammoniaak. Nitritite kõrge taseme põhjuseks on see, et ammoniaagi oksüdeerimine toimub kiiremini kui nitritite oksüdeerimine. Noorte taimede puhul muudab suur nitritite kogus taime juured altiks haigustele. (Raviv, 2008) Nitritite sisaldus võib olla ka suur juba toimivates süsteemides, kus kalade

asustustihedus on väga suur. (Graber, 2008; Roosta, 2012) Vesiviljeluses ja akvapoonikas toimub pidevalt ammonifikatsioon, nitrifikatsioon ja lämmastiku sidumine erinevate organismide poolt (Joonis 5).



Joonis 5. Lämmastikuringe (Parker, 2012)

1.2.1. Vesiviljelus Eestis

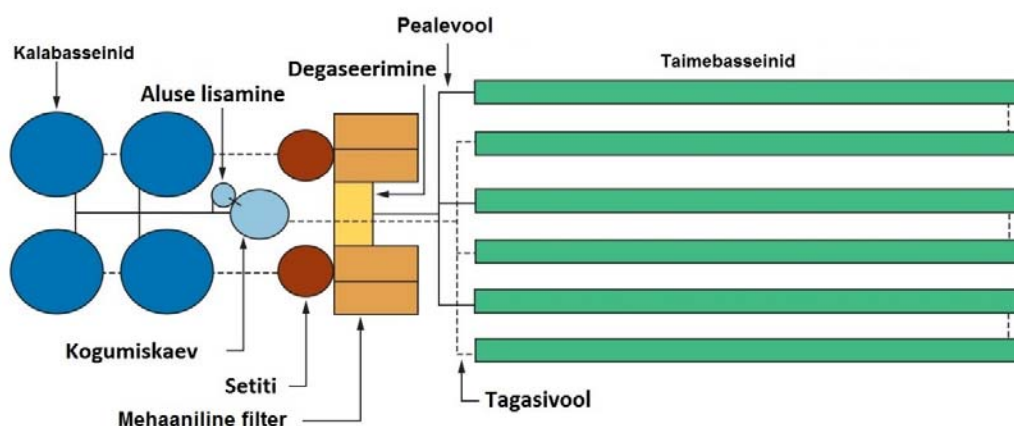
Eestis kasvatati 2011. a kaubakala kokku 751 t (Statistikaamet), millest kõige suurema osa moodustasid vikerforell (83%) ja karpkala (11%). Kaubakala kasvatamisega tegeles 23 kalakasvandust. Eestis tarbiti kala ja kalatooteid 10,3 kg kala kaalu järgi arvestatud. Kogu Eesti kala ja kalatoodete tarbimine oli ca 13 700 t. (Eesti Konjunktuuriinstituut, 2014) Seega toodavad Eesti kalakasvandused ainult 5,5% kala tarbimise mahust, mistõttu tarbitakse lisaks veekogudest püütud kala ning importkala. Punase kala turg on Eestis üle 2000 t ning sellest katab kodumaine tootmine alla poole. Vee korduvkasutusega süsteemi kasutas kalade kasvatamiseks Eestis 2012. a 10 ettevõtet. Kasvatatavad kalaliigid nendes süsteemides olid vikerforell, angerjas, angersäga ning siig. Kogu toodangu mahuks oli 121 t. (Tomingas, 2012)

Vesiviljeluse arengustrateegias on üheks eesmärgiks seatud vesiviljeluse sektori 50% turuosa saavutamine aastaks 2020 Eesti vesiviljelustoodete siseturul. Hinnanguliselt on selle turu suurus 2020. a 6500 t, mis tähendab, et tuleb saavutada üle 3000 t suurune müügiimaht. Eesmärgi täitmiseks on paika pandud põhisuunad, millest üks on tootlikkuse suurendamine. See hõlmab

endas investeeringuid suunatud tehnoloogiatesse, mis parandavad tõhusust ja toodangu kvaliteeti, ning investeeringuid vesiviljelust toetavatesse (sünergiat loovatesse) kõrvaltegevustesse ja keskkonda säästvatesse tegevustesse (Tallinna Ülikool, 2013). Akvapoonika on selleks kindlasti sobilik tehnoloogia, sest võimaldab kalakasvandustel teenida lisatulu taimekasvatusest ning odavamalt toime tulla toitainete vähendamisega kasvatusüsteemis.

1.3. Akvapoonilised lahendused

Tänapäeva akvapoonilised süsteemid võivad olla oma ülesehituselt erinevad, kuid sisuliselt on tegu RASi seadmetikuga, kuhu on lisatud hüdroponika komponent. Kombineerimisvõimalusi on mitmeid, sest hüdroponilisi ja RASi lahendusi on erinevaid. Rakocy (2006) on välja töötanud lahenduse, mis kasutab hüdroponilise osana DFT lahendust (Joonis 6). RAS koosneb kalabasseinidest, setititest, filtritest, kogumiskaevust, degaseerijast ning mahutist, kuhu lisatakse perioodiliselt aluseid.



Joonis 6. Rakocy välja töötatud akvapooniline süsteem (Rakocy, 2006)

Kommertssüsteemides kasutataksegi peamiselt edukaks kujunenud DFT lahendust. NFT lahendus on levinud hüdroponika kommertssüsteemides, seega on mõistlik uurida selle kasutamise võimalusi ka akvapoonilistes süsteemides. Kui NFT süsteemi rakendada akvapoonikas, siis sellel on mõned miinused võrreldes teiste tehnikatega. Näiteks DFT lahendust on kergem käitada, sest vee kogus ja seega puhverdusvõime on suur, mis levendab võimalikke tehtud vigu. NFT madal puhverdusvõime tagab kiirema toitainete kontsentratsiooni tõusmise. NFT miinuseks on vajadus setete parema filtreerimise järele. Selleks on vajalik lisada süsteemi eraldi setete eraldaja või

biofilter, mis omakorda suurendab kulutusi. Eraldi biofiltri ja setete eraldaja kasutamine on kasulik, sest nii on vajadusel võimalik kalade ja taimede osa lahti ühendada ning eraldiseisvalt kasutada (Lennard, 2010). Rakocy (2006) toob aga välja, et akvapoonikas on soovituslik eesmärk kombineerida hüdroponiline osa biofiltriga, et ei oleks vaja investeerida eraldi biofiltrisse, mis ongi akvapoonika üks suuremaid eeliseid.

Akvapoonikal on mitmeid eeliseid hüdroponika ees. Hüdroponikas kasutatakse taimede kasvatamisel mineraalseid toitaineid, mida toodetakse taastumatutest allikatest. See teeb tootmise jätkusuutmatuks, sest ühel hetkel pole neid ressursse enam võtta. Akvapoonikas tuleb valdav osa toitainetest süsteemi kalasööda näol. Kalasööt on loomset ja taimset päritolu ning selle tootmise tooraine on taastuv. Akvapoonika näol on tegemist looduslähedasema süsteemiga ning sellest on võimalik saada kaks kultuuri: kalad, mis on oluline valguallikas, ning taimed, mis on mineraalainete ja vitamiinide rikkad. Kui hüdroponikaga kaasneb alati küllaltki suurel hulgal veevahetus, siis akvapoonikas piirdub veevahetus tavaolukorras ainult setete eemaldamise ja aurumisega. Seega on eraldatud piirkondades, kus vett on vähe, mõistlikum rakendada akvapoonikat. Akvapoonika abil on kalakasvatajatel võimalik kulusid kokku hoida, sest taimed toimivad biofiltrina ning hüdroponika viljelejatel on võimalik säästa toitainete pealt. Oluline akvapoonika eelis on aga selle suurem saagikus hüdroponika ees (Savidov, 2007).

Akvapooniline süsteem suudab tõhusalt vähendada toitaineid vees (keskmine toitainete vähenemine on 47-89,5%). Suurem TANi omastamine on seotud nitraatide hulga suurenemisega, mille põhjuseks on nitrifikatsiooni suurenemine ja piiratud denitrifikatsioon. Denitrifikatsiooni pidurdavad lahustunud hapnik, süsteemis saadaolev süsinik või lühike viibeaeg kogumismahutis. Nitraatide hulka vähendavad taimed oma juurte abil. Samuti assimileerivad mikroorganismid nitraate kas vees või taime juurtel. (Endut, 2009)

Akvapoonilises süsteemi peab olema võimalus eemaldada süsteemist tahked osakesed ehk kalasõnnik, mis tekib kalade elutegevuse käigus. Umbes 25% sööda kuivmassist eritavad kalad tahkel kujul. Eemaldamiseks võib kasutada filtreerimist või settimist. Kui sõnnikut ei eemalda, siis need võivad kinnituda taimede juurte külge ning põhjustada hapniku puudust. Sõnnik tarbib lagunemisel hapnikku ning eritab ammoniaaki. Samuti ohustab see nitrifitseerivaid baktereid, mis vajavad elutegevuseks hapnikku. Pärast sõnniku eemaldamist on oluline etapp biofiltratsioon ehk ammoniumi oksüdeerimine nitrititeks ja nitraatideks. NFT tehnika kasutamisel on bakterite jaoks

vähem pinda millele kinnituda ning kasutada tuleb kindlasti eraldi biofiltrit, et tagada piisavas ulatuses nitrifikatsioon. Ilma biofiltrita võivad tekkida kalade jaoks ohtlikud ammooniumi kontsentratsioonid. (Rakocy, 2006) Kalade reovee filtreerimine suurendab taimede saagikust märgatavalt. Võrreldes filtreerimata veega võib saagikus olla isegi 87% suurem. Filtreerimisel kasutatakse nii biofiltrit kui ka tahkete osade eraldamist. (Endut, 2009)

1.3.1. Taimede toitumine akvapoonikas

Kui hüdroponikas saavad taimed toidained kätte vees lahustatud mineraalsetest sooladest, siis akvapoonikas sõltub taimede toitumine kalasöödaga süsteemi lisatud toitainetest. Kalad tarbivad sööta ning eritavad jääkaineid. Osa nendest lahustub vees ning on taimedele kättesaadav, ülejäänud on aga tahkel kujul erineva suurusega orgaaniline osa. Toitained lahustuvad tahketest osakestest mineralisatsiooni käigus, mille viivad läbi bakterid. Lõpuste kaudu eritab kala süsihappegaasi ja ammoniaaki, mis on oluline lämmastikuringes. Lämmastik on taimede jaoks üks olulisemaid elemente, mida taim vajab. Seda omastab taim nitraadi kujul, mis on tekkinud nitrifikatsiooni tulemusena. (Rakocy, 2006)

Kuna kalad ei vaja suures koguses kaaliumi ning kalasöödad on optimeeritud kaladele vastavaks, siis sinna ei lisata piisavalt kaaliumi (Graber 2008). Seega tuleb mõningaid aineid täiendavalt süsteemi lisada. Lisaks kaaliumile tuleb lisada ka kaltsiumi ja rauda. Taimed tarbivad palju kaltsiumi ja kaaliumi ning sellepärast on ka hüdroponika toitainelahustes nende sisaldus kõige kõrgem. Kui kalasööda kogus on reguleeritud optimaalseks arvestades taimede hulka, siis akvapoonikas ei teki ülejäänud toitainete kuhjumist ega puudujääki. Kalad tagavad piisava toitainete kontsentratsiooni ning taimed hoiavad ära nende liigse kuhjumise, mis muidu vesiviljeluses tekiks. Sellise lahenduse puhul saab vett korduvkasutada aastaid. Toitainete tasakaal sõltub kasutatava vee algsest toitainete sisaldusest, tootmismeetodist (partii kaupa või järkjärguline) ning kasvatatavast taimekultuurist. (Rakocy, 2004)

Akvapoonikas on kaaliumi sisaldus oluliselt madalam kui hüdroponikas. See võib olla isegi 45 korda madalam. Selle tulemusena on kaaliumit vähe ka taimedes. Kaaliumi defitsiidi põhjus peitub kalasöödas. (Graber, 2008)

1.3.2. Kaaliumi omastamine ja roll taimes

Kaalium on oluline element kõikide elusorganismide jaoks. Taimedes on K^+ kõige olulisem katioon nii koguseliselt kui ka oma füsioloogiliste ning biokeemiliste funktsioonide poolest. Kaaliumi esineb taimedes 0,4-1,6%. Kõige rohkem leidub seda noortes kasvavates organites ning õitsemise ajal (Kärblane, 1996). Samas ei ole kaalium taime rakus püsivalt ühegi molekuli koostises (Resh, 2004). Taimed suudavad kaaliumi efektiivselt ning suures koguses omastada ja taime sees ringi liigutada (Mengel, 2001). Kaalium on väga oluline taime veerežiimi juures, sest K^+ omastamine mõjutab taime vee omastamist. Piisava kaaliumi varu korral püsib taimes rohkem vett ning selle kasutamine on efektiivne. Taimeraku laienemine sõltub turgorist ning selleks on vajalik piisav K^+ olemasolu (Mengel, 1982). Efektiivse vee tarbimise (ühe ühiku kuivaine tootmine ühe ühiku vee auramise kohta) tulemusena on taimes täpsemini reguleeritud õhulõhede avanemine ja sulgumine. Päikesetõusu ajal, kui taime veevarud on küllaldased, sõltub õhulõhede avanemine K^+ kiirest sissevoolust sulgrakkudesse, et fotosüntees saaks alata. Kaalium akumuleerub sulgrakkudesse ning suureneva turgori tõttu toimub õhulõhede avanemine (Humble, 1971). Lisaks toimib kaalium koensüümna ning mitmete ensüümide aktivaatorina. Valgusüntees vajab kõrget kaaliumisisaldust (Resh, 2004).

Katioonide (sh K^+) omastamisel võib taimes tekkida ionide antagonism. Katioonide koguhulk taimes ei muutu ning kui teatud katiooni hulka suurendada, siis vähenevad teiste katioonide kogused taimes. Suurendades näiteks Mg^{2+} kogust, mida väetisega taimedele antakse, siis on leitud, et päevalilledes väheneb Na^+ ja Ca^{2+} sisaldus ning suureneb Mg^{2+} oma. Sarnane olukord kehtib teiste katioonide sisalduse tõstmisel. Katioonide ülesvõtul on kaaliumioonid eeliseisus, sest nende omastamiseks on mitmeid efektiivseid mehhanisme. Kui kaaliumioone on lahuses vähe, siis on konkurents katioonide vahel väiksem ning ülejäänud katioonide omastamine on intensiivsem. Sealjuures ei muutu aga katioonide üldine kogus. Puuduoleva kaaliumioonide koguse suudavad asendada teised katioonid, kuid nad ei suuda asendada kaaliumi füsioloogilisi funktsioone. See väljendub taime madalamas saagikuses ja kvaliteedis. Anioonide omastamisel esineb vähem antagonismi. Kõige sagedasemalt esineb seda NO_3^- ja Cl^- vahel. Kõrge kloriidi sisaldus vähendab nitraatide omastamist ja vastupidi. (Mengel, 2001)

Taimerakkudes asuvad ionikanalid, mille kaudu saavad liikuda erinevad ionid sh K^+ . Kaaliumiooni jaoks on olemas kaks peamist kanalitüüpi. Üks neist on suunatud sissepoole ja teine

väljapoole. On leitud, et kõrge Ca^{2+} sisaldus vees takistab K^+ välja liikumist taimest. Seda nähtust on nimetatud ka kui Vietsi efektiks. Kui taim kasvab keskkonnas, mis on happeline ja kus Ca^{2+} sisaldus on madal, võib taimedest toimuda oluline K^+ väljavool. (Viets, 1944)

Toitainete omastamise kiirust reguleerib taime kasvamise kiirus ning füsioloogilised vajadused. Kiiresti kasvav taim omastab ka palju toitaineid. Kui taimel on olnud puudus teatud elemendist, siis suudab taim seda elementi omastada suure kiirusega. Omastamise kiirust mõjutab toitaine sisaldus taime koes. Mida suurem on sisaldus, seda madalam on omastamise kiirus. Toitainete omastamine nõuab energiat ning kui hapniku kogus või süsivesikute sisaldus taime koes on madal, siis on madal ka toitainete omastamine. (Mengel, 2001)

1.4. Toitainevaegus

Liebigi miinimumseaduse kohaselt ei määra organismi kasvu kogu toitainete hulk. Selle asemel on kasvu piirajaks hoopis element või ressurss, mis osutub limiteerivaks (Ploeg, 1999). Selle illustreerimiseks on võrdlusena kasutatud veega täidetud tünni. Kui tünni lauad on erineva pikkusega, siis vee koguse tünnis määrab kõige lühem laud, mitte kõige pikem. Sarnase põhimõttega on väljend „kett on nii tugev, kui on selle nõrgim lüli“. Sellest tulenevalt ei suurene taime saagikus kui anda taimale juurde juba küllaldasi toitaineid. Kasvu parandamiseks tuleks anda taimale neid elemente, millest tal on kõige rohkem puudu.

Toitumishäire on taime füsioloogia häire, mille tagajärjeks on ebanormaalne kasv ning mida põhjustab mineraalsete toitainete vaegus või mürgisus. See võib väljenduda nii taime väliste kui sisemiste sümptomitena. Iga elemendi vaegus tekitab sellele omaseid sümptomeid. Elemendid saab liigitada nende taimes liikuvuse alusel. Liikuvad elemendid suudavad taimesiseselt ümber asuda vanematest taimeosadest uutesse aktiivselt kasvavatesse taimeosadesse (nt noored taimelehed). Sellisel juhul tekivad toitainevaeguse sümptomid vanematele lehtedele. Liikuvad elemendid on magneesium, fosfor, kaalium, tsink ja lämmastik. Liikumatu elementide vaeguse korral jäävad need vanematesse lehtedesse ning sümptomid tekivad noorematele lehtedele. Liikumatud elemendid on kaltsium, raud, väävel, boor, vask ja mangaan. Ühe toitaine puudus või mürgisus võib takistada taimel omastamast ka teisi toitaineid ning siis esineb taimel mitme elemendi vaegus. Sel juhul on raske visuaalselt kindlaks teha mis elementide vaegusega on tegemist. (Resh, 2004)

Üheks viisiks, kuidas saab kindlaks teha teatud elemendi vaegust taimes, on teha taimele keemiline analüüs. Tabelis (Tabel 2) on toodud normaalsed elementide sisaldused ning need kontsentratsioonid, mille korral esineb juba vaegus salatitaimel lehes.

Tabel 2. Salatilehe elementide kontsentratsioonid vaeguse ja normaalsete tingimuste korral (Gerber, 1986)

Element	Vaegus	Normaalne sisaldus
Makroelemendid	%, kuivainest	%, kuivainest
Lämmastik (N), kokku	-	2,1-5,6
Nitraat-N (NO ₃ -N)	-	2,5-9,3
Fosfor (P)	0,4	0,5-0,9
Kaalium (K)	4,0	4,0-10,0
Kaltsium (Ca)	0,8	0,9-2,0
Magneesium (Mg)	0,3	0,4-0,8
Väävel (S)	0,2	0,2-0,5
Mikroelemendid	ppm, kuivainest	ppm, kuivainest
Boor (B)	22	25-65
Raud (Fe)	*	50-500
Mangaan (Mn)	22	25-200
Vask (Cu)	2,5	5-18
Tsink (Zn)	25	30-200
Molübdeen (Mo)	0,2	0,5-3,0

*Ei diagnoositud

Kui taimel esineb kaaliumivaegus, siis see ei avaldu kohe visuaalsete sümptomite näol. Kõigepealt langeb taime kasvukiirus ning alles hiljem tekib kloroos ja nekroos. Kaaliumivaeguse sümptomid esinevad kõigepealt teisel ja kolmandal kõige vanemal lehel, kuid mitte kõige vanemal (Pissarek, 1973; Morard, 1973). Enamikel taimedel algavad nekroosi ja kloroosi sümptomid taime lehtede servadest ja otstest. Kaaliumivaeguse sümptomid esinevad kõigepealt vanematel lehtedel. Taimedel esineb vähenenud turgor ning tekkinud vee puuduse tõttu vajuvad taimed longu. See omakorda vähendab taime põua-, külma-, ja seenhaiguskindlust. (Mengel, 2001)

Kui taimele on kaaliumi kättesaadav rohkem kaaliumi kui taim vajab, siis taim omastab seda ka suuremas koguses. Selle tagajärjel on taim kudedes tavapärasest kõrgem kaaliumi kontsentratsioon, mida nimetatakse kaaliumi luksuslikuks tarbimiseks. (Rehm, 2002) Kaaliumi liigne omastamine võib viia magneesiumi ning võimalik, et ka mangaani-, tsingi- või rauavaeguse tekkeni. Rauavaegust iseloomustab tugev leheroodudevaheline kloroos, mis sarnaneb magneesiumivaeguse tunnustele, kuid esineb noorematel lehtedel. Kaltsiumivaeguse puhul on häiritud pungade areng ning juure otsad surevad tihtipeale. Kõigepealt ilmnevad sümptomid noorematel lehtedel, mis on moonutatud kujuga, väiksed ning mis on täpilised või kärbunud laikudega. (Resh, 2004)

Kurkide toitainelahuses kasvatamisel on leitud, et ammoniaagi (NH_3) kõrge kontsentratsioon takistab taimel kaaliumi omastamast. Mõju avaldub eelkõige taimel juurtes. Ammoniaak mõjutab metabolismi ja juurte läbilaskevõimet ning hingamist. (Schenk, 1979)

Kaaliumivaeguse leevendamiseks kasutatakse traditsioonilises põllumajanduses ja hüdroponikas kaaliumväetisi. Levinumad nendest on KCl (52% kaaliumi), K_2SO_4 (37-43% kaaliumi), KNO_3 , ja KH_2PO_4 . Taimede väetamiseks võib kasutada ka puutuhka. Kaaliumi esineb selles keskmiselt 5-11%. Kaalium on tuhas karbonaatsel kujul ning hästi lahustuv, mis muudab selle taimedele hästi omastatavaks. Väga heaks väetiseks sobib see tavapõllumajanduses liiga happeliste muldade väetamiseks, sest see toimib neutraliseerijana. Kõik kaaliumväetised on hästi lahustuvad ning seetõttu ei mõjuta väetise liik kasutamise efektiivsust. Samuti ei mõjuta see väetises oleva kaaliumi omastamist taimede poolt. (Kärblane, 1996)

Puutuha koostis sõltub puu liigist ja kasvukoha mullast. Põlemistemperatuur mõjutab nii tuha tekkekogust kui ka koostist. Kui tuhas esineb söetükke, siis see viitab mittetäielikule põlemisele. Kõrgem temperatuur (kuni 600 °C) aitab kaasa kütuse täielikumale põlemisele, kuid väga kõrge temperatuuri juures võivad laguneda juba anorgaanilised ühendid ning osa nendest lenduda. Haava ja papli põletamisel 600 °C leidub nende tuhas kõige rohkem kaltsiumi (21% ja 26% vastavalt) ja kaaliumi (11% ja 8% vastavalt). Puutuha välja leostuvad komponendid on leeliseliste metallide (nt K ja Na) soolad. Seega võib tuhaves leiduda nende metallide hüdroksiide, karbonaate, kloriide ja sulfaate. Vees lahustuvaid kaaliumisooli nimetatakse potaseks. Puutuhhas on selleks peamiselt kaaliumkarbonaat. (Misra, 1993)

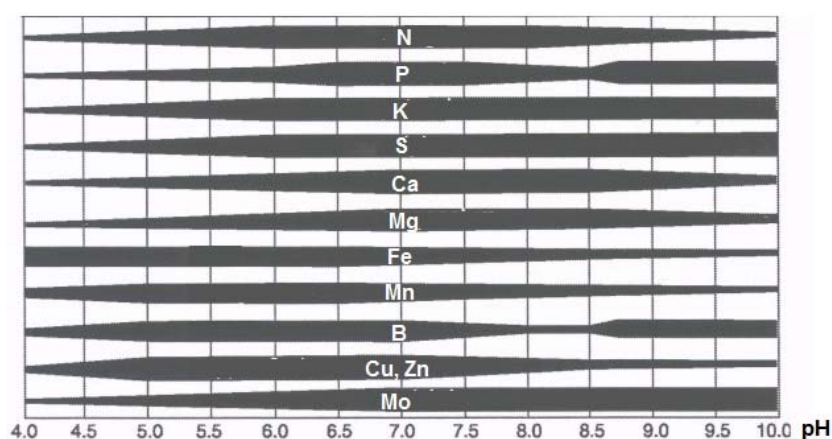
Peale kaltsiumi on toitainete sisaldus tuhas küllaltki madal ning seega ei loeta seda kõrge väärtusega väetiste hulka. Puutahas võib esineda raskmetalle, mis võivad keskkonnale ohtlikuks osutada. Võrreldes kommertsväetistega oleks puutuha NPK keskmiselt 0:1:3. Seda juhul, kui seda on põletatud tööstuslikus katlas kõrge temperatuuriga. Tavalises ahjus põletades madalama temperatuuri juures oleks NPK 0:3:14 (Naylor, 1986).

1.5. Süsteemi olulised parameetrid

Akvapoonikas mõjutab vee keemilised ja füüsikalised parameetrid nii kalu kui ka taimi. Muutes vee tingimusi taimedele sobivaks, võib see muutuda kahjulikuks kaladele ja vastupidi. Näiteks kasvatades külma veega kohastunud kalu ja soojalembeseid taimi, sureb üks liik paratamatult välja või selle kasv pidurdub. Seega tuleb teha õige valik organismide osas ning tuleb jälgida vee füüsikalisi ja keemilisi parameetreid, et need ei muutuks kaladele ja taimedele ebasobivaks või mürgiseks. Vajadusel tuleb keskkonnatingimusi kunstlikult muuta, et neid hoida sobivas vahemikus.

1.5.1. pH tase

Väga tähtis näitaja on pH tase, sest see mõjutab paljusid teisi parameetreid. Kõige olulisem neist on nitrifikatsioon, mis toimub kõige paremini pH taseme 7,5 või kõrgema juures ning praktiliselt seiskub vähem kui pH taseme 6,0 juures. Nitrifikatsiooni käigus tekib happeid ning tavaliselt tuleb süsteemi lisada selle tasakaalustamiseks aluseid. Kõige parem on lisada kaalium- või kaltsiumhüdroksiidi, sest nii satub süsteemi täiendavalt kaaliumi ja kaltsiumi, millest tekib tavaliselt puudus. Samuti mõjutab pH tase toitainete lahustuvust. Mõned elemendid, nagu kaalium, väävel ja molübdeen on taimedele kergemini kättesaadavad pigem kõrgema pH taseme juures. Raud eelistab aga madalamat pH, sest vastasel korral sadestub see veest välja. Optimaalne pH tase on 6,5 või veidi madalam. Liiga kõrge või liiga madala pH taseme korral sadestuvad mõned toitained veest välja ning taimed ei saa neid enam omastada. Liiga madala pH taseme korral hakkab tekkima ohtlik ammooniumi sisaldus, sest nitrifikatsioon ei toimi enam nii hästi. (Rakocy, 2004; Rakocy, 2006)



Joonis 7. Toitainete kättesaadavus taimetele sõltuvalt pH tasemest (Truog, 1946)

Kui pH tase on 7,0, siis esineb TAN peamiselt ammooniumioonina, kuid kui pH tase on 8,0, siis esineb enamik sellest ammoniaagi kujul. Kuna ammoniaak on kaladele mürgisem, siis peaks pH tase olema pigem 7 juures. (Parker, 2012, Graber, 2008)

Süsteemis võib vesi olla kergelt aluseline (pH 7,0-7,8), kui vees on palju kaltsiumisooli (250 mg/l). Seda võib põhjustada näiteks kasutatav substraat (kui kasutatakse). Kui kasutada Eesti põhjavett, siis on vesi kergelt aluseline pärast seda, kui sealt on välja lendunud süsihappegaas. Kõrge pH korral väheneb taimedele kättesaadav ja omastatav rauahulk. Rauapuudus mõjutab aga taimede morfoloogiat ja füsioloogiat, aeglustades muuhulgas lehtede kasvu ja takistades uute tekkimist. Samuti mõjutab see taime kuivmassi, viljade suurust ja kvaliteeti. (Roosta, 2011; Roosta, 2012; Savidov, 2004) Aluselised tingimused (pH 7,5-8,0) soosivad aga nitrifikatsiooni ja ionide omastamist. Suure koguse nitraatide omastamise tagajärjel annavad taimed HCO_3^- ioone välja, mis suurendab aluselisust veelgi (Rana, 2011; Savidov, 2004). Hüdroponikas kasvatatavate taimede jaoks on kõige sobilikum pH tase vahemikus 5,8-6,2. (Rakocy, 2006)

Kuna akvapoonikas on kõikidel organismidel erinevad sobivad pH tasemed, siis tuleb teha selles osas kompromiss. Seega on mõistlik hoida pH taset 7 ümber, mis on sobilik nii nitrifitseerivatele bakteritele, kaladele kui ka taimedele.

1.5.2. Söötmine ja lisatoitained

Akvapoonikas viiakse toitained süsteemi kalasööda näol ning olenevalt kalaliigist mitu korda päevas. See tagab toitainete pideva juurdevoolu taimedele. Hüdroponikas tehakse valmis üks

lahus ning see vahetatakse välja või seda täiendatakse siis, kui selles on toitained suures osas ära kasutatud. Seetõttu ei pea akvapoonikas olema vees nii kõrge toitainesisaldus. Al-Hafedh (2008) kasutas akvapoonilises DFT süsteemis kolme erinevat sööda kogust, mis olid 56, 113 ja 169 g/m²/p. Ühegi söödakoguse juures ei tekkinud taimedel toitainepuuduse sümptomeid.

Rakocy (2006) soovib sööda kogust seadistada akvapoonikas vastavalt sellele, kui palju on taimede kasvupinda. Sööda ühikuks on grammi päevas ühe ruutmeetri taimede kasvupinna kohta (g/m²/p). Kui sööda kogus on suurem kui taimed suudavad omastada, siis hakkavad toitained süsteemis kuhjuma ning võivad muutuda taimedele mürgiseks. Kuhjumise ärahoidmiseks tuleb suurendada veevahetust. Soovituslikud söödakogused salati kasvatamisel DFT süsteemis on 60-100 g/m²/p. Silmas tuleb pidada ka süsteemis ringleva vee kogust. DFT puhul on enamik veest süsteemi hüdropoonika osas, samas kui NFT puhul on seal asuva vee kogus väike. Kui mõlemas süsteemis on sama palju kalu ja taimi, siis 100 g/m²/p söödakoguse juures on toitainete kontsentratsioon NFT süsteemis neli korda suurem kui DFT. Seega peaks optimaalne söödakogus NFT süsteemis olema neljandik DFT omast. (Rakocy, 2007)

Toitainete kontsentratsiooni tasakaalustamiseks vees tuleks kasvatada korraga erinevas arengujärgus olevaid kalu kui ka taimi. Nii ei teki suurt langust ega tõusu toitainete osas, kui toimub toodangu realiseerimine. Rakocy (2004) on leidnud, et partii kaupa kasvatamisel (söödanormiga 81,4 g/d/m²) võib tekkida toitainete puudujääk sama sööda koguse juures. Järkjärgulisel kasvatamisel (söödanormiga 99,6 g/d/m²) ei tekkinud toitainete puudujääkide ilminguid. Taimede suurt toitainete vajadust hilisemas kasvufaasis tasakaalustab väike toitainete vajadus varajases faasis. Järkjärgulise kasvatamise korral kasvasid taimed neljas erinevas (nädalase vahega) kasvufaasis. Lühikese tootmistsükliga taimi on seega soovitatav kasvatada järkjärguliselt.

Taimed vajavad 13 erinevat toitaineid kasvuks, millest 10 on kalasöödas piisavas koguses. Kolm elementi, mida tuleb lisada, on kaalium, kaltsium ja raud. Kaaliumi ja kaltsiumi saab lisada alustena (KOH, Ca(OH)₂) ning raua saab juurde anda kelaadiühenditena, kus raud on seotud orgaanilise ühendiga (nt EDTA või DTPA), ning ei sadestu välja. (Rakocy, 2007) Tomatitaimede kasvatamisel akvapoonikas on leitud, et kõige rohkem suurendab viljade arvu ja saagikust kaaliumi ja raua täiendav lisamine (Roosta, 2011).

1.5.3. Elektri juhtivus

Elektrijuhtivust kasutatakse hüdroponikas, et hinnata millal on vaja välja vahetada toitainelahus. Kui lahuses hakkavad soolad kuhjuma, siis suureneb elektrijuhtivus. Seega viitab kõrge elektrijuhtivus sellele, et süsteemis on liiga palju ja tõenäoliselt taimedele kahjulikke sooli (nt NaCl), sest neid taimed ei omasta. Sobilik elektrijuhtivuse vahemik hüdroponikas on 2-4 mS/cm. Kui näitaja läheb üle 4 mS/cm, siis võivad taimed hakata närbuma, kasv aeglustub ning viljad hakkavad lõhenema. Madalamad väärtused sobivad kurkidele (1,5-2,0 mS/cm) ning kõrgemad tomatitele (2,5-3,5 mS/cm). Andriolo (2005) leidis, et kõrge toitainete kontsentratsioon (üle 2 mS/cm) vähendab salatitaimede võrsete märgmassi, kuid kuivmassi ei mõjutanud isegi toitainelahus, mille elektrijuhtivus oli 4,72 mS/cm. Elektri juhtivus oleneb soolade kontsentratsioonist, kuid samuti ka keemilisest koostisest, kuna mõned väetistes kasutatavad soolad juhvivad paremini elektrit kui teised. Nitraatide kontsentratsioon ei kajastu elektrijuhtivuses nii hästi kui näiteks kaaliumi ioonid. (Resh, 2004)

Liigne soolsus (NaCl) avaldab taimedele negatiivset mõju ning piirab taimede kasvu. Kõrge soolsus mõjutab tugevasti taime lehtede arvu ja suurust, märg- ja kuivmassi ning lehtede suurust. Hüdroponilises NFT süsteemis on katseliselt leitud, et soolsuse taseme 50 mM (5 mS/cm) juures ei ole mõjutused veel väga suured, kuid taseme 100 mM (10 mS/cm) juures on kõik eelpool mainitud näitajad madalamad kui kontrollkatses. (Al-Maskri, 2010)

1.5.4. Hapnikusisaldus

Kalade jaoks on väga tähtis lahustunud hapniku sisaldus vees. Liiga madala sisalduse korral hakkavad kalad surema. Lahustunud hapniku sisaldus peaks olema vähemalt 5 mg/l ning kalade kasvu jaoks parim kontsentratsioon on 6 mg/l. Kaladele on ohtlik ka kõrge CO₂ sisaldus, mis tekib kalde elutegevuse käigus. Seda on võimalik vähendada nõrgfiltri ehk *degasseri* või aeraatorite abil. CO₂ sisaldus peaks olema väiksem kui 25 mg/l (Parker, 2012). Lisaks kaladele on hapnik vajalik biofiltri jaoks, kus toimub nitrifikatsioon ning mis kulutab palju hapnikku. 1 mg/l TANi oksüdeerimiseks kulub 4,58 mg/l lahustunud hapnikku (Boyd, 2001; Rakocy, 2007)

1.5.5. Temperatuur

Temperatuur mõjutab akvapoonikas nii kalu, taimi kui ka biofiltri toimimist. Biofilter töötab temperatuurivahemikus 10-35 °C, kusjuures optimaalne temperatuur on 30 °C ümber. Liiga madala temperatuuri korral väheneb bakterite aktiivsus ning nitrifikatsioon aeglustub. Kaladele sobiv temperatuur oleneb liigist. (Bregnballe, 2010) Külma veekalad nagu näiteks lõhe vajavad jahedamat vett (10-18 °C) ning soojaveekalad nagu näiteks karpkala eelistavad soojemat vett (üle 21°C). (Parker, 2012)

Taimede jaoks sõltub optimaalne temperatuur liigist. Lisaks veetemperatuurile on oluline jälgida õhutemperatuuri. Aedsalatit (*Lactuca Sativa*) kasvatatakse tavaliselt jahedamas kliimas, kuid Thompson (1998) on katseliselt leidnud, et kui hüdroponikas kasvatada aedsalatit soojemas vees, siis on saagikus suurem. Aedsalati kuivmass, mis kasvas 24 °C vees, oli suurem kui nendel, mis kasvasid 17 °C või 31 °C vees.

1.5.6. Taimede kastmise intervallid ja hüdrauliline koormus

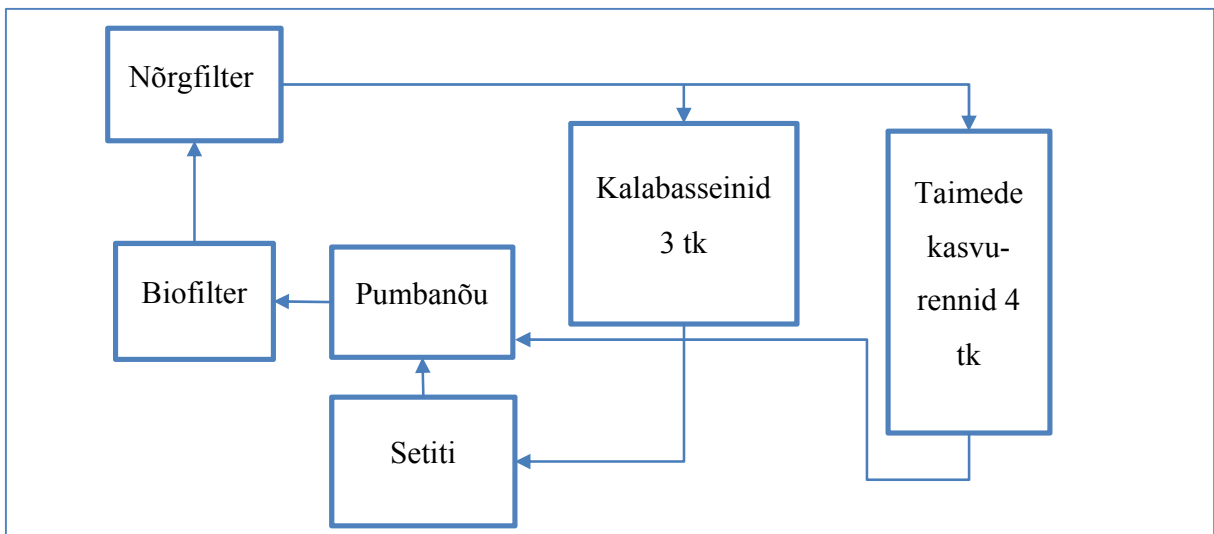
Hüdroponikas, nagu ka akvapoonikas, sõltub taime veevajadus taimeliigist, kasvuetapist, valgusest, temperatuurist ja päevapikkusest. Suurema lehtede arvu ja suurusega taimed vajavad rohkem vett, sest transpiratsiooni kaudu eritub taimest palju vett. Samuti suurendab veevajadust kõrge temperatuur. Liiga harv kastmine tekitab taimedel veepuuduse, kuid liiga sagedane kastmine võib tekitada hapnikupuuduse või haiguste tekke. Tiheda kastmise puhul ei kuiva taime juured ära ja neil ei teki toitainete puudust, sest nad on nendega kogu aeg kontaktis. Vähetõenäoline on see, et tihe kastmine tekitab õhupuudust juurtel, kui ei kasutata just väga peenet substraati. Suurendades hüdraulilist koormust, suureneb BHT₅ näitaja, heljuvaine kontsentratsioon ning ammoniumlämmastiku ja nitritite omastamine (Endut, 2009).

2. Materjal ja meetoodika

2.1. Katse ülesehitus ja katseseade

Töö eesmärkide saavutamiseks viidi läbi kaks katset. Mõlemas katses kasvatati aedsalatit akvapoonilises süsteemis. Esimene katse oli kontrollkatse ning teine katse oli hüpoteesi tõestamiseks. Teise katse ajal lisati süsteemi vette puutuhka, mis hüpoteesi kohaselt peaks tõstma taimede saagikust.

Katseseade (Joonis 8 **Error! Reference source not found.**) asus Eesti Maaülikooli vesiviljeluse osakonna köetavas keldris ja koosnes vesiviljeluse ja hüdroponika komponendist. Vesiviljeluse osa koosnes kolmest kalabasseinist (à 700 l), setitist (600 l), biofiltrist (740 l) ja nõrgfiltrist mahuga 270 l. Kogu süsteemi vee maht oli ca 4150 l. Veeringluse tagas pump võimsusega 400W. Maksimaalne võimalik veevahetus oli kaks korda tunnis. Kalabasseinide ja setitina kasutati IBC mahuteid. Kalabasseinides asusid õhudifuuserid lahustunud hapniku sisalduse suurendamiseks vees. Setiti eesmärk oli aeglustada veevoolu ja välja setitada süsteemis ringi liikuvad tahked osakesed, nagu näiteks kalasõnnik, söömata jäänud sööt või biokile.



Joonis 8 Katseseade skeem (nooled näitavad vee liikumissuunda)

Biofiltri anum oli plastikust ja alt koonusjas, milles asus 100 l RK-plasti ujuvat graanulit, kogupinnaga 75 m². Biofiltri vett aereeriti kompressori abil, mis tekitas selles turbulentsse keskkonna. Biokile moodustus graanulite peale ning viis läbi nitrifikatsiooni.

Nõrgfilter moodustus suure kogupinnaga elementidest (54 m²), mida mööda nõrgus vesi alla. Nõrgumise käigus toimub vee aereerimine ning CO₂ lendumine. Lisaks aitas CO₂ eemaldada ventilaator, mis juhtis gaasid õue. Nõrgfiltri elementidele moodustus samuti biokile ning ka seal toimus nitrifikatsioon. Nõrgfilter toimus nii biofiltri kui ka degaseerijana.

Hüdroponika osana kasutati NFT lahendust, mis koosnes neljast kahe meetri pikkusest pealt kinnisest plastrennist, millel on peal augud taimepottide jaoks. Rennid saadi ettevõttelt Grüne Fee Eesti AS, kes kasutab neid ka oma tootmises. Rennid asusid üksteise kõrval ning igast ühest voolas läbi sama suur vee hulk. Kõikide kasvurennide peale kokku oli vee vooluhulk ca 12 l/min (720 l/h). Kasvurennide kohal asusid ühe meetri kõrgusel kaks LED valgustit (à 75W). Valgustitel olid valdavalt punased ning mõned sinised pirnid. Valguspäeva pikkuseks oli 19 h alates kella 05.00 kuni kella 00.00. Vältimaks kalade häirimist valgusega, oli taimede ja kalade kasvualade vahel läbipaistmatu kilekardin.

Pumbast algas kogu süsteemis vee liikumine. Pumbanõust pumbati vesi kõigepealt biofiltrisse, kus toimus nitrifikatsioon, seejärel liikus vesi vabavoolvalt nõrgfiltrisse, kus toimus nii nitrifikatsioon kui ka CO₂ ärastamine. Peale nõrgfiltrit voolas vesi korraga kolme suunda: osa veest voolas pumbanõusse tagasi, osa kalabasseinidesse ja ülejäänud taimede kasvurennidesse. Kalabasseinidest toimus vee väljavool basseini põhjast, mis vähendas nendes setete kuhjumist ja lihtsustas hooldust. Basseinide tagasivool oli suunatud setitisse. Taimede kasvurennide tagasivool oli suunatud pumbanõusse.

Katsetaimedena kasutati aedsalatit (*Lactuca sativa*). Salatitaimed saadi ettevõttelt Grüne Fee Eesti AS, kus need olid ettekasvatatud turbamullas 14 päeva vanuseks. Külmahajustuse vältimiseks transporditi taimed katseseadme asukohta termokastides.

2.2. Süsteemi hooldamine ja veeproovide võtmine

Süsteemi puhastati regulaarselt setetest, mis tekkisid kalade elutegevuse käigus. Selleks kasutati sifooni, millega saadi kätte setted setitist ja biofiltri all asuvast vannist. Hoolduse, lekete, aurumise ja transpiratsiooni kaudu süsteemist väljunud vesi asendati regulaarselt trassiveega, mille kogus märgiti üles. Kuna trassivesi on pigem kõrge pH tasemega, siis vee pH taseme tasakaalustamiseks lisati setitisse soolhapet (HCl) vastavalt vajadusele ja happe olemasolule.

Katseseadmest võeti katsete ajal iga kahe päeva tagant veeproove, mis säilitati analüüside tegemiseni külmkapis. Veeproovid võeti nii, et suuremad veevahetused ei mõjutaks tulemusi ehk enne veevahetust või mitu päeva hiljem. Kõikidest proovidest määrati ammooniumi, nitriti ja nitraadi sisaldus. Lisaks määrati mõlema katse neljast veeproovist (üks enne katset ning kolm katse ajal) kaaliumi sisaldus. Analüüsid tehti TTÜ Tartu Kolledži mullabioloogia laboris. Iga päev mõõdeti käsिमोतeseadmetega setitis asuva vee elektrijuhtivust, hapnikusisaldust, pH taset ja temperatuuri. Õhutemperatuuri mõõdeti termomeetri abil.

2.3. I katse ehk kontrollkatse

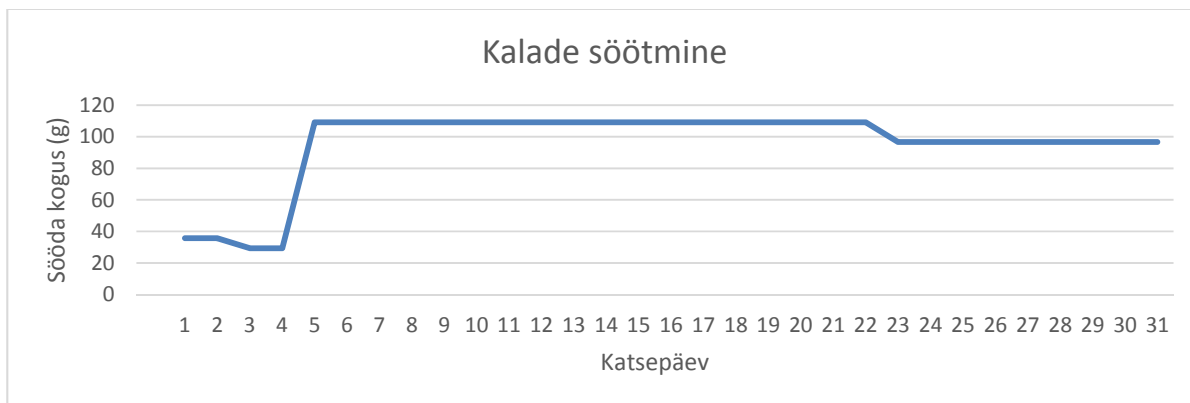
Esimene katse toimus ajavahemikul 28.11.2014 - 28.12.2014. Üks kuu enne katse algust käivitati biofilter NH_4Cl ja NaNO_2 abil, et sinna tekiks biokile ja toimuks nitrifikatsioon. Enne katse algust lisati vette keedusoola (NaCl) kalade elutingimuste parandamiseks. Selle süsteemist väljaviimiseks toimus päev enne katse algust ning katse teisel päeval 700 l suurune veevahetus. Selleks, et viia veel täiendavalt varasemast ajast jäänud sooli süsteemist välja, toimus 11. katsepäeval ühe kalabasseini vee väljavahetamine 700 l ulatuses. Enne katse algust mõõdeti vee parameetrid (Tabel 3).

Tabel 3. Vee parameetrid enne katse algust

NH_4^+ (mg/l)	NO_2^- (mg/l)	NO_3^- (mg/l)	K^+ (mg/l)	Õhu temperatuur (°C)	Vee temperatuur (°C)	O_2 sisaldus (mg)	pH	Elektri- juhtivus (mS/cm)
1,46	0,22	23,14	9,31	16,5	17,2	6,0	7,74	4,94

Katse ajal olid kahes kalabasseinis karpkalad (*Cyprinus carpio*) (ca 30 tk) ja ahvenad (*Perca fluviatilis*) (ca 30 tk), keda söödeti granuleeritud kuivsöödaga automaatsööturi abil. Karpkaladele anti sööta, mis sisaldas 35% valku ning see moodustas valdava osa antud sööda kogusest. Ahvenatele anti 51% valgusisaldusega sööta. Akvapoonilise süsteemi toimimise seisukohast on oluline sööda kogus mitte kalade arvukus, sest söödaga tagatakse piisav toitainete sisaldus vees. Söötmist alustati mõned päevad enne katse algust. Katse käigus antud sööda koguseid kajastab Joonis 9. Kuna taimed olid alguses väiksed, siis kaladele antav sööda kogus oli alguses samuti väike. Katse kuuendal päeval suurendati sööda kogust ca neli korda. Sööda kogus oli seejärel iga

päev sama suur (ca 100g) välja arvatud katse viimased kolm päeva, kus seda natuke langetati, sest ahvenaid polnud selleks ajaks enam basseinis. Kogu kaladele antud sööda kogus katse ajal oli 2964 g.



Joonis 9. Kalade söötmine I katse ajal

Kaladena kasutati katses karpkalu ja ahvenaid. Karpkalad olid pärit kalakasvandusest ning ahvenad olid püütud looduslikust veekogust.

Süsteemi lisati värsket vett katse ajal kokku 4381 l. Kolmel korral toimus suurem veevahetus. 24. katsepäeval toimus veevahetus ühes kalabasseinis. Vee lisamist päevade lõikes kajastab Joonis 10.



Joonis 10. Vee lisamine I katse ajal

Katse alguses pandi süsteemi 51 salatitaimet ning neid kasvatati 30 päeva. Pärast katse lõppu võeti analüüsiks 15 taimet, mida pildistati ja kaaluti. Taimedel mõõdeti võrsete märgmass, kuivmass ning kuivatatud ja jahvatatud võrsete koondproovist tehti Eesti Maaülikooli Põllumajandus- ja keskkonnainstituudi Taimetähtsuse laboris keemiline analüüs N, P, K, Ca, Mg elementide osas.

2.4. II katse puutuhaga

Teine katse toimus ajavahemikul 23.01.2015 - 22.02.2015. Katse ajal olid ühes kalabasseinis samad karpkalad (26 tk), mis esimese katses, keda söödeti granuleeritud kuivsöödaga (valgusisaldus 35%) automaatsööturi abil. Ahvenaid ei olnud selles katses. Kahe katse vahelisel ajal langetati sööda kogust 21 grammini päevas. Katse käigus antud sööda koguseid kajastab Joonis 11. Joonis 9. Sööda kogused olid katse alguses madalamad nagu esimese katse puhul, sest taimed olid väiksed. Katse kuuendal päeval suurendati sööda kogust ca neli korda. Sööda kogus oli seejärel iga päev sama suur (ca 100 g), välja arvatud katse viimased kaks päeva, kus seda natuke tõsteti. Kogu kaladele antud sööda kogus katse ajal oli 2873 g.



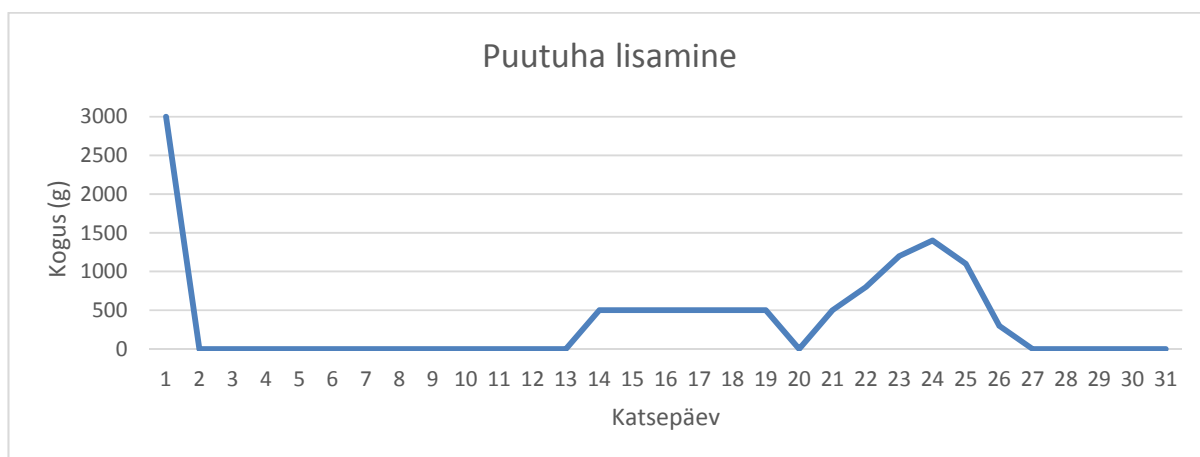
Joonis 11. Kalade söötmine II katse ajal

Süsteemi lisati värsket vett katse ajal kokku ~1750 l. Vee lisamist päevade lõikes kajastab Joonis 12.



Joonis 12. Vee lisamine II katse ajal

Katse vältel lisati biofiltri all asuvasse vanni lehtpuutuhka. Tuhk saadi kase, lepa ja remmelga põletamisel Viadrusi madalsurve katlas ning sellest sõeluti välja suuremad söetükid. Tuhk pandi vette geotekstiili sisse nii, et sealt said ühendid vette lahustuda, kuid tuhaosakesed ei pääsenud välja. 14. katsepäeval võeti vana tuhk veest välja ning lisati uus. Tuhka ei lisatud korraka väga palju, et hoida ära suur pH taseme tõus. Kokku lisati tuhka 11,3 kg. Tuha lisamist päevade lõikes kajastab Joonis 13. Tuhast välja leostuva kaaliumisisalduseks mõõdeti laboris eelnevalt 20,2-21,4 mg K ühe g tuha kohta.



Joonis 13. Tuha lisamine II katse ajal

Katse alguses pandi süsteemi 51 salatitaimet ning neid kasvatati 30 päeva. Pärast katse lõppu võeti analüüsimiseks 15 taimet, mida pildistati ja kaaluti. Taimedel mõõdeti võrsete märgmass, kuivmass ning kuivatatud ja jahvatatud võrsete koondproovist tehti Eesti Maaülikooli Põllumajandus- ja keskkonnainstituudi taimebiokeemia laboris keemiline analüüs N, P, K, Ca ja Mg elementide osas.

2.5. Analüüsid

Ammooniumiooni kontsentratsioon lahuses määrati Kandeleri (1996) järgi. 5 ml eeltöödeldud (segatud 0,0125 M $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ -ga) proovi segati 2,5 ml Reagent A (võrdses vahekorras 0,3 M NaOH + 1,06 M $\text{C}_7\text{H}_5\text{NaO}_3$ (naatriumsalitsülaat) + destilleeritud vesi) ja 1 ml 39,1 mM $\text{C}_3\text{Cl}_2\text{N}_3\text{NaO}_3$ -ga (naatriumdikloroisotsüanuraat). Katsekolbe loksutati ning lasti seista 30 minutit toatemperatuuril. Kiirguse neeldumist mõõdeti 660 nm juures spektrofotomeetriga ning ammoonium-lämmastiku kontsentratsioon arvutati kaliibergraafiku alusel.

Nitriti kontsentratsioon lahuses määrati Kandeleri (1996) järgi. 5 ml eeltöödeldud (segatud 0,0125 M $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ -ga) proovi segati ammoniumkloriidi puhverlahuse (0,19 M NH_4Cl) ja 2 ml värvireagendiga (sulfaniilamiid + N-(1-naftüül)-etüleendiamiinvesinikkloriid + kontsentreeritud fosforhape + destilleeritud vesi). Katseklaase segati ning lasti seista 15 minutit toatemperatuuril. Kiirguse neeldumist mõõdeti 520 nm juures spektrofotomeetriga ning nitraadi kontsentratsioon arvutati kaliibergraafiku alusel.

Nitraadi kontsentratsioon lahuses määrati Kandeleri (1996) järgi. Eeltöödeldud (segatud 0,0125 M $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ -ga) proovid segati destilleeritud vee ja väävelhappega (konts. Väävelhape lahjendatud 1:10 destilleeritud veega). Kiirguse neeldumist mõõdeti 210 nm juures spektrofotomeetriga ning nitraadi kontsentratsioon arvutati kaliibergraafiku alusel.

Kaaliumi kontsentratsioon määrati turbidimeetrilise meetodi abil, kasutades LaMotte-i poolt toodetud kaalimi testkomplekti vastavalt tootjapoolsetele juhisteile. Analüüsitava proovile lisati 6% NaOH lahust ning tetrafenüülboraati. Moodustunud hägusust mõõdeti tootja poolt varustatud seadmetega ning tulemus arvutati ümber vastavalt lisatud proovi hulgale.

Taimede massi analüüsimiseks võeti pärast mõlemat katset 15 taime kasvurennide keskosast, kus oli kõige valgustatum ala. Taimedel lõigati maha juur ning võrsed kaaluti. Kuivmassi leidmiseks kuivatati taimed kuivatuskapis 70 °C juures (esimese katse taimed 7 päeva, teise katse taimed 9 päeva) ning seejärel kaaluti. Taimede kuivmassi osakaal leiti 15 taime peale kokku, mitte iga taime kohta eraldi. Taimede keemiliseks analüüsiks jahvatati kuivatatud taimed ning saadeti taimebiokeemia laborisse. Täiendavaks võrdluseks võeti kolm poest ostetud Grüne Fee salatitaime (ühes potis kolm taime) ning nende võrsed kaaluti samuti enne ja peale kuivatamist.

Tulemuste statistilise analüüsi tegemiseks kasutati Microsoft Exceli statistikapaketti (*Data analysis*). Keskmiste võrdlemisel ning statistiliselt olulise erinevuse leidmiseks kasutati F-testi ja T-testi.

3. Tulemused

3.1. Veeanalüüsid

Kontrollkatse ajal mõõdetud õhu ja vee temperatuur olid keskmiselt veidi üle 17 °C ning ei kõikunud suures ulatuses (Tabel 4), sest katseseade asus köetavas keldris. Hapnikusisaldus püsis võrdlemisi stabiilsena 5,7 mg O₂ (58%) juures. Keskmise pH tase oli 7,97 ning oli vahemikus 7,69-8,26. Elektrijuhtivus oli keskmiselt 3,22 mS/cm. Katse alguses oli see näitaja suurem, sest varasemast ajast oli vees veel keedusoola, kuid katse ajal langes see veevahetuse tõttu. Ammooniumi keskmine sisaldus vees oli 2,31 mg/l ning muutus katse ajal küllaltki palju (standardhälve 2,50). Maksimaalne sisaldus oli ligi 7 mg/l. Nitritite sisaldus oli keskmiselt 0,56 mg/l. Nitraatide keskmine sisaldus oli 33,10 mg/l ning see kõikus küllaltki palju katse ajal (standardhälve oli 21,98 ning maksimum oli 74,31 mg/l). Kaaliumi keskmine sisaldus vees oli 21,05 mg/l. Enne katse algust mõõdetud kaaliumi sisaldus vees oli 9,31 mg/l.

II katse ajal mõõdetud õhu ja vee temperatuur olid keskmiselt 18 °C ning ei kõikunud suures ulatuses (Tabel 4). Hapnikusisaldus püsis võrdlemisi stabiilsena 5,75 mg O₂ (60%) juures. Keskmise pH tase oli 8,30 ning oli vahemikus 8,14-8,63, mis on kõrgem kui kontrollkatses. Elektrijuhtivus oli keskmiselt 2,41 mS/cm, mis on vähem kui kontrollkatses. Näitaja varieerus vähe (standardhälve 0,11). Ammooniumi keskmine sisaldus vees oli 4,70 mg/l ning muutus katse ajal küllaltki palju (standardhälve 3,63). Maksimaalne sisaldus oli 12,56 mg/l. Nitritite sisaldus oli keskmiselt 0,12 mg/l. Nitraatide keskmine sisaldus oli 12,45 mg/l, mis on vähem kui kontrollkatses. See näitaja kõikus küllaltki palju katse ajal (standardhälve oli 9,32 ning maksimumväärtus oli 33,14 mg/l). Kaaliumi keskmine sisaldus vees oli 21,19 mg/l. Enne katse algust mõõdetud kaaliumi sisaldus vees oli 10,69 mg/l.

Tabel 4. Süsteemi vee parameetrid

Parameeter	Keskmine + standardhälve (ulatus)	
	I katse	II katse
Õhu temperatuur (°C)	17,4±0,7 (16,0-19,0)	18,2±0,6 (17,0-19,5)
Vee temperatuur (°C)	17,3±0,6 (16,2-18,2)	18,0±0,4 (17,2-18,6)
Hapnikusisaldus (mg O ₂)	5,66±0,34 (5,1-6,5)	5,75±0,17 (5,4-6,2)
Hapnikusisaldus (%)	58,42±3,26 (53,0-67,0)	60,29±1,68 (56-64)

Parameeter	Keskmine + standardhälve (ulatus)	
	I katse	II katse
pH	7,97±0,16 (7,69-8,26)	8,30±0,11 (8,14-8,63)
Elektrijuhtivus (mS/cm)	3,22±0,50 (2,71-4,45)	2,41±0,11 (2,23-2,61)
NH ₄ ⁺ (mg/l)	2,31±2,50 (0,29-6,97)	4,70±3,63 (0,29-12,56)
NO ₂ ⁻ (mg/l)	0,56±0,22 (0,26-0,92)	0,12±0,09 (0,00-0,32)
NO ₃ ⁻ (mg/l)	33,10±21,98 (18,55-74,31)	12,45±9,32 (0,50-33,14)
K ⁺ (mg/l)	21,05±3,92 (16,57-23,82)	21,19±4,20 (16,46-24,51)

3.2. Taimed

Peale I katse lõppu olid taimed pigem väikest kasvu ja kidurad (Joonis 14) võrreldes poest ostetud Grüne Fee salatitaimedega (Joonis 20 ja Joonis 21). Taimed olid kasvatanud pikad varred (Joonis 16, Joonis 17) ning taimedel oli raskusi püsti püsimisega. Vanemad lehed olid longus ning ainult kõige nooremad lehed suutsid ennast püsti hoida. Üksikud vanemad lehed olid kärbumas või juba kärbunud. Lehed olid valdavalt helerohelised, mõned isegi valkjad. Kaks kõige vanemat pärislehte olid taimedel aga rohelisemad. Taimede juurestik oli väike ning vähearenenud, kuid proportsioonis taime üldise suurusega. Kasvurennide otste lähedal, kuhu ulatus vähem valgust, oli näha, et taimed olid veidi kiduramad.

Peale II katset olid taimed valdavalt väiksemat kasvu kui esimeses katses (Joonis 15). Kuigi kasv oli väiksem, ei olnud need taimed kasvatanud nii palju vart ning taime üldine kuju oli korralikum. Lehed olid üldiselt väiksemad ning veidi longus, kuid taimed suutsid ennast paremini püsti hoida. Üksikud vanemad lehed olid kärbumas või juba kärbunud. Lehtedel esines tugev kloroos, paljudel lehtedel puudus roheline värv täielikult ning lehed olid valkjad. Esimesed pärislehed olid aga sama rohelised nagu I katse taimedel. Kõige noorematel lehtedel esines veidi rohelist värvi. Taimede juurestik oli väike ning vähearenenud, kuid proportsioonis taime üldise suurusega. II katse taimedest oli üks taim selgelt teistest eristuv. See taim oli 15 analüüsitava taime seas. Taim oli teistest taimedest oluliselt suurem ning sarnanes pigem I katse taimedega, sest kasvatas palju vart ja oli rohelisem. Kasvurennide otste lähedal, kuhu ulatus vähem valgust, oli näha, et taimed olid väiksemad.



Joonis 14. I katse analüüsitavad taimed



Joonis 15. II katse analüüsitavad taimed



Joonis 16. I katse taim



Joonis 17. I katse taim



Joonis 18. II katse taim



Joonis 19. II katse taim



Joonis 20. Poetaim



Joonis 21. Poetaim

I katse taimede keskmine märgmass oli 8,35 g (standardhälve 2,10) (Tabel 5). Kuivmass oli keskmiselt 0,32 g. II katse taimede keskmiste masside arvutamisel on kõrvale jäetud üks taim, mis osutus erindiks. Selle mass erines valimi keskmisest rohkem kui kolme standardhälbe võrra (märgmass oli rohkem kui kaks korda suurem kui järgmise kõige suurema taime mass) ning ka selle välimus erineb oluliselt teistest analüüsitavatest taimedest. See taim ei peegelda selle katse tulemusi ning moonutaks tulemusi liiga palju. Seega oli II katses 14 taime keskmine märgmass 5,01 g (standardhälve 1,96). Kuivmass oli keskmiselt 0,25 g. Võrdluseks olid poetaimed katsetaimedest oluliselt suuremad ja raskemad. Kolme taime keskmine märgmass oli 28,98 g ning kuivmass 1,24 g. F-testi ja t-testi rakendamise tulemusena erinesid üksteisest kahe katse taimede märgmassid ja kuivmassid. II katse taimede massid olid väiksemad. Taimede kuivmassi osakaal I katses oli madalam (3,82%) kui II katses (4,96%). Poetaimede näitaja jäi vahepeale (4,28%).

Tabel 5. Taimede massid

Parameeter	Keskmine + standardhälve (ulatus)		
	I katse	II katse	Poetaimed
Märgmass (g)	8,35a±2,10 (5,47-13,02)	5,01b±1,96 (2,04-8,09)	28,98±11,53 (18,75-41,47)
Kuivmass (g)	0,32a±0,08 (0,20-0,51)	0,25b±0,09 (0,13-0,40)	1,24±0,57 (0,75-1,86)
Kuivmassi osakaal (%)	3,82	4,96	4,28

Erinev täht I ja II katse masside väärtuse järel näitab statistiliselt olulist erinevust $P < 0,05$

Taimede keemiline analüüs (Tabel 6) näitas, et lämmastiku sisaldus oli kõikides taimedes üle nelja protsendi. I ja II katse taimedes oli lämmastiku osakaal peaaegu sama, kuid poetaimedes oli see veidi suurem. Fosfori sisaldus oli kõikides taimedes sarnane, olles vahemikus 0,888-1,151 %. Kaaliumisisaldus oli kõige väiksem I katse taimedes (5,375%) ning kõige kõrgem poetaimedes (9,068%), II katse taimedes oli see 7,975%. Kaltsiumi- ja magneesiumisisaldus oli kõige kõrgem I katse taimedes (4,441% ja 0,824% vastavalt), veidi madalam II katses (3,527% ja 0,696% vastavalt) ning kõige madalam poetaimedel (1,243% ja 0,346% vastavalt). Kõige suuremad erinevused eri katsete taimede toitainete sisalduse osas puudutasid K, Ca ja Mg osakaalu. Kaltsiumisisaldus oli poetaimedes ca kolm korda madalam kui II katse taimedes ning ca neli korda madalam I katse taimedest. Ülejäänud elementide osakaal oli poetaimedes kõige kõrgem. I ja II

katse taimede vahel oli kõige suurem erinevus kaaliumi osas, mille sisaldus oli ligi poole võrra suurem I katse taimedest.

Tabel 6. Salatitaimede võrsete kuivaine keemiline koostis elementide kaupa (%), sulgudes toodud muutus võrreldes I katse taimedega

Taimed	N	P	K	Ca	Mg
I katse	4,096	0,888	5,375	4,441	0,824
II katse	4,122 (+0,6%)	1,068 (+20,3%)	7,975 (+48,4%)	3,527 (-20,6%)	0,696 (-15,5%)
Poetaimed	4,701 (+14,8%)	1,151 (+29,6%)	9,068 (+68,7%)	1,243 (-72,0%)	0,346 (-58%)

3.3. Kalad

I katse lõpupoole hakkasid surema ahvenad ja mõned üksikud karpkalad. Välisel vaatlusel esinesid kaladel täppverevalumid ja kõhualune hüperemia. Kalade kehapinnalt leiti erineva vanuse ja suurusega algloomi *Ichthyophthirius multifiliis*. Katse lõpuks olid kõik ahvenad hukkunud. Karpkalu raviti viidi läbi ravi süsteemist lahti ühendatud basseinis ühe päeva jooksul. Pärast seda olid kalad terved. Teise katse jooksul ei hukkunud ühtegi kala ning katse lõpuks oli süsteemis alles 26 karpkala.

4. Arutelu

Mõlemas katses jäid salatitaimed üsna väikseks võrreldes taimedega, mida on kasvatatud Grüne Fee hüdroponilises süsteemis (poetaimed). Läbi viidud katsete eesmärgiks ei olnud saavutada maksimaalne saagikus ning seetõttu ei olnud katsesüsteem optimeeritud taimede maksimaalse saagikuse saamiseks. Taimede tagasihoidliku kasvu põhjusteks võivad olla madalam toitainete kontsentratsioon vees ning madalam valgustugevus. Võrreldes hüdroponikaga jäid nitraatide ja kaaliumi sisaldused keskmiselt alla soovitusliku miinimumi (Molyneux, 1988). Nitraatide keskmine sisaldus oli I ja II katses vastavalt 33 ja 12 mg/l ning kaaliumi sisaldus mõlemas katses 21 mg/l. Põhjuseks ei ole asjaolu, et tegemist on akvapoonika süsteemiga, sest teistes katsetes on selgunud, et akvapoonikas on taimede saagikus sarnane võrreldes hüdroponikaga (Graber, Junge, 2008) ning teatud juhtudel isegi suurem (Savidov, 2007).

kahe läbiviidud katse taimede võrdlemisel selgus, et II katses, kuhu lisati tuhka, oli taimede märgmass ja kuivmass väiksem. Masside erinevus oli küll statistiliselt oluline, kuid kuna taimed olid väiksed, siis on raske öelda, kas see erinevus on ka majanduslikult oluline. Taimede omavaheline suuruse erinevus oli ka visuaalselt selgelt eristatav. Selle põhjuseid võib olla mitu. Teises katses oli pH tase süsteemis kõrgem (8,3) kui esimeses katses (8,0). Kuna pH skaala on logaritmiline, siis tegemist on juba arvestatava erinevusega. Kõrgema pH juures ei ole teatud toitained enam taimedele kättesaadavad ning see mõjutab taimede kasvu. Kõrge pH vähendab näiteks raua ja mangaani kättesaadavust. Katsete ajal ei lisatud süsteemi täiendavalt rauaühendeid ning on teada, et akvapoonilistes süsteemides tekib ajapikku rauavaegus, sest kalasöödas ei ole seda piisavalt. Taimedest ei määratud raua sisaldust vastava aparatuuri puudumise tõttu, kuid tõenäoliselt osutus just see limiteerivaks elemendiks. Rauavaegust taimedes näitab asjaolu, et mõlemas katses olid taimede esimesed pärislehed oluliselt rohelisemad kui ülejäänud lehed, samas kui kõik nooremad lehed olid helerohelised. Raud on taimes liikumatu element ning ta mõjutab klorofüllil tootmist. Kui esimeses katses olid taimede lehed üldiselt helerohelised, siis teises katses olid taimede lehed väga valkjad. Puutuhk suutis tagada teiste elementide piisava sisalduse ning rauavaegus avaldus II katses seega selgemini kui I katses. Taimede masside seisukohast tuleks teha täiendavaid katseid, kus tingimused on optimeeritud nii rauasisalduse, pH kui ka toitainete kogu kontsentratsiooni osas. See annaks kindluse hindamiseks, kas taimede massid on ka majanduslikult oluliselt erinevad.

Esimeses katses oli taimede kuivmassi osakaal taime märgmassist madalam kui teises katses. See näitab, et taim suutis edukalt omastada vett. Näitaja oli madalam kui poetaimedel. Madal kuivmassi osakaal näitab ka seda, et taim ei suuda kasvatada kuivmassi, sest esineb toitainete puudus. Teises katses oli kuivaine osakaal suurem kui poetaimedel ning visuaalselt ei olnud näha, et taimedel oleks veepuudus. Seega ei olnud taimede kuivmasside erinevused nii suured kui märgmasside omad, kuid nende vahel oli siiski statistiliselt oluline erinevus.

II katses osutus kaaliumisisaldus vees samaväärseks, võrreldes I katsega, ometi lisati sinna suures koguses tuhka, millest leostus kaaliumi. Arvestades vee kogust süsteemis ning eelnevalt tehtud tuhaanalüüsi, oleks pidanud kaaliumisisaldus vees olema vähemalt 15 mg/l võrra suurem kui esimeses katses. Katse käigus lisati tuhka juurde ning sisaldus oleks pidanud veelgi suurem olema. Tõenäoliselt suutsid taimed täiendava kaaliumi veest omastada, mida näitab ka taimede keemiline koostis. II katse taimedes oli kaaliumisisaldus pea poole võrra suurem I katse taimedega võrreldes, kuid jäädes siiski alla poetaimede kaaliumisisaldusele. Seega suutis puutuhk leevendada taimede kaaliumivaegust ning toimis lisaväetisena.

Võttes arvesse Gerberi (1985) välja toodud salatitaimede toitainete kontsentratsioone, siis ei esinenud ei I ega II katse taimedes tõsiseid toitainevaeguseid. Lämmastik, kaalium ja magneesium jäid soovituslikku vahemikku, fosforit esines isegi veidi rohkem kui vaja ning kaltsiumisisaldus oli oluliselt suurem kui taimedel vaja. Kuigi kaaliumisisaldus oli normi piires, siis oli seda I katse taimedes oluliselt vähem kui II katse omas või poetaimedes. Kõige olulisematest makrotoitainetest (NPK) oli kaaliumisisaldus I katse taimedes kõige lähemal miinimumkontsentratsioonile ning see tingis ka vaeguse sümptomid. Kui samas katsesüsteemis kasvatada taimi pikaajaliselt ning mitte lisada täiendavat kaaliumväetist, siis tekiks taimedel tõenäoliselt oluline kaaliumivaegus.

Kõrge kaltsiumisisalduse põhjuseks taimedes oli ionide antagonism. I katses oli kaaliumisisaldus vees madal, kuid kuna trassivesi oli kõrge kaltsiumisisaldusega, siis üritas taim kompenseerida nende kationidega kaaliumi vähesust. Sarnane oli seis magneesiumiga. Eriti ilmekas on see võrdluses poetaimedega, kus kaaliumisisaldus oli väga kõrge ning kaltsiumi- ja magneesiumisisaldused küllaltki madalad. Taime jaoks oli kaaliumi külluses ning kuna taim suudab seda teistest kationidest efektiivsemalt omastada, siis oli selle sisaldus suurem. Puutuha lisamisega sattus vette palju kaltsiumiühendeid, mille tase oli niigi kõrge arvestades trassivee karedust. Sellest hoolimata oli kaltsiumisisaldus II katse taimedes madalam kui I katse omas (olles

taimes siiski külluslikus koguses), mis ilmestab jällegi asjaolu, et taim omastab kaaliumi kaltsiumist efektiivsemalt. Seega võttes arvesse ionide antagonismi on puutuhk sobilik lisaväetis, sest ei tekita vaegusi K, Ca ega Mg osas.

Süsteemi aluselise keskkonna tõttu, mida tekitas trassivesi ning puutuhk, tuli mõlemas katses vette lisada hapet (HCl), et tuua pH taset allapoole. Pikaajaliselt töötavas ning optimaalselt konstrueeritud akvapoonilises süsteemis on tavaliselt tegemist pigem kergelt happelise keskkonnaga. Seda põhjustab nitrifikatsioon ning lisaks hoiab pH taset madalal see, kui veena kasutatakse vihmavett, mis on kergelt happeline. Läbiviidud katsetes kasutati trassivett, mis on põhjavesi ning kergelt aluseline. Süsteemis oli veehulk suur võrreldes kalade ja taimede arvukusega ning see soosis süsteemis kergelt aluselise keskkonna püsimist. Esimese katse esimeses pooles oli pH tase pigem üle 8, kuid teises pooles alla 8 ning stabiliseerus katse lõpuks. See näitab, et nitrifikatsioon suutis lõpuks tasakaalustada vee aluselisust. Teises katses muutis tuha lisamine veekeskkonna märgatavalt aluselisemaks ning katse käigus toimunud nitrifikatsioon ei suutnud pH taset stabiliseerida.

Kaaliumi lahustumiseks tuha lisati see otse süsteemi vette. Katse käigus selgus, et see pole kõige parem lahendus, sest tuha osakesed on erineva läbimõõduga ning mõned nendest on väga väiksed. Need osakesed pääsesid geotekstiilist läbi ja hakkasid süsteemi vees ringlema. Seda oli märgata just tuha lisamisel. Kalabasseinides ja setitis ei olnud näha tuhaosakesi, kuid ei saa välistada, et need kinnitusid taime juurtele ning biofiltri graanulitele ja võisid takistada seetõttu nitrifikatsiooni. Edaspidisel tuha kasutamisel veesüsteemides tuleks seda eelnevalt eraldi mahutis lahustada. Peale tuhaosakeste settimist saaks juhtida vee ülevoolu abil süsteemi. Nii on väiksem võimalus, et tuhaosakesed satuvad süsteemi.

II katse teises pooles oli ammooniumitase oodatust kõrgem (üle 5 mg/l). Sööda kogus oli stabiilne, seega võis põhjus olla biofiltris. Katse teises pooles lisati tuhka sagedamini ja korraga vähem kui katse alguses, mistõttu oli peenete tuhaosakeste sisaldus vees suurem. Need osakesed võisid pärssida nitrifikatsiooni, sest ammooniumitase oli katse lõpus oluliselt kõrgem kui esimeses katses ning nitraatide sisaldus kordades madalam.

Täiendavate toitainetena lisatakse akvapoonikas kaltsiumi, kaaliumi ja rauaühendeid, sest nendest tekib puudus. Tuhka saaks edaspidi kasutada kui põhilise kaltsiumiallikana ning teisese kaaliumiallikana. Täiendavalt tuleb lisada kaaliumisooli, vastasel juhul tuleb tuhka lisada väga

palju ning see tingib suure koguse happe lisamise, mis ei pruugi olla majanduslikult otstarbekas. Selle hindamiseks tuleb läbi viia aga täiendavaid katseid. Rakocy (2006) on lisanud süsteemi kaltsium- ja kaaliumhüdroksiidi võrdsetes kogustes. Seega tuleks kaaliumi täiendada nii palju, kui on kaltsiumi ja kaaliumisisalduse vahe kasutatavas tuhas. Eelistada tuleks suurema kaaliumisisaldusega tuhka, milleks võib puutuha asemel olla ka rohtse biomassi tuhk. Suurte puutuha koguste kasutamisel võivad kaasneda probleemid tuha ning hiljem järelejäänud pulbi käitlemisel, arvestades selle füüsikalisi omadusi. Alguses tekib palju tolmu ning hiljem on vaja leida viis pulbi ladestamiseks. See-eest on tuhk aga tasuta, sest tegemist on jäätmega ning selle kättesaadavusega ei tohiks probleeme olla.

Käesoleva töö raames ei uuritud puutuha võimalikku toksilisust taimedele ning raskmetallide sisaldust taimes. Suurema koguse tuha kasutamisel võivad raskmetallide sisaldused jõuda tasemeni, mis võivad pärssida taimekasvu või taimes akumulereerumise korral olla söögiks kõlbmatud. Samuti pole välistatud mürgise mõju tekkimine kaladele, mida küll käesolevas töös ei täheldatud. Seda aspekti tuleks uurida edasiste uuringute raames.

Kokkuvõtteks olid I katses taimede mass suurem ning taimed olid värvuse poolest kvaliteetsemad. II katses oli aga taimede kuju ning keemiline koostis parem.

Kokkuvõte

Käesoleva magistritöö eesmärgiks oli välja selgitada, kuidas mõjutab puutuha lisamine salatitaimede kasvu ning nende kvaliteeti akvapoonilises süsteemis. Selleks ehitati katsesüsteem, kus kasvatati salatitaimi, karpkalu ja ahvenaid. Tehti üks 30 päevane kontrollkatse ning puutuhaga katse, mille tulemusi võrreldi omavahel. Täiendava võrdlusena kasutati poest ostetud hüdroponilises süsteemis kasvatatud taimi. Analüüsiti taimede märg- ja kuivmassi, keemilist koostist makroelementide osas, vee temperatuuri, hapnikusisaldust, elektrijuhtivust, pHd, lämmastikufraktsioonide- ja kaaliumisisaldust.

Läbiviidud katsete tulemusena selgus, et mõlemas katses olid salatitaimed üldiselt tagasihoidliku kasvuga võrreldes poetaimedega, kuid selle põhjuseks oli süsteemis üldiselt madal toitainete sisaldus. Kontrollkatses (I katse) ning ilma puutuhata kasvatatud taimed olid nii märg- kui ka kuivmassi poolest suuremad taimedest, mis kasvasid puutuhaga väetatud süsteemis (II katse). Taimede keskmine märgmass oli $8,35 \pm 2,10$ g ning $5,01 \pm 1,96$ g vastavalt. Taimede keskmine kuivmass oli $0,32 \pm 0,08$ g ning $0,25 \pm 0,09$ g vastavalt. I katse taimede lehed olid ka oluliselt rohelisemad, kuid taimelehed ei suutnud ennast püsti hoida. II katses olid taimed keemilise koostise poolest kvaliteetsemad, sest nende kaaliumisisaldus oli ligi 50% kõrgem I katse taimede omast. Samuti olid need taimed kuju poolest paremad. Taimede väiksema massi ja tugeva kloroosi põhjuseks võis olla madal rauasisaldus, mida käesoleva töö raames ei analüüsitud, kuid mida esineb tihti akvapoonilistes süsteemides. Seda võis võimendada veidi kõrgem pH tase puutuha katses võrreldes kontrollkatsega.

Tuha kasutamisega kaasnesid mõned probleemid nagu pH tõus, mida tuli langetada täiendava happe lisamisega süsteemi vette, ning peene heljumi mõningane levik süsteemis. Samuti tuli kasutada suhteliselt suurtes kogustes puutuhka, sest selle kaaliumisisaldus ei olnud suur. Neid probleeme on võimalik edaspidi leevendada süsteemi parema optimeerimise ja kõrgema kaaliumisisaldusega puutuha kasutamise abil.

Töö eesmärgid said täidetud ning püstitatud hüpotees sai osaliselt kinnitatud, sest puutuha abil õnnestus tõsta taimede kaaliumisisaldust. Küll aga ei leidnud kinnitust see, et puutuhk suurendab taimede kasvu. Tulevastes katsetes tuleks uurida, kas optimeeritud süsteemis omab madalam taimede mass ka majanduslikku tähtsust ning kas tuha kasutamine oleks majanduslikult otstarbekas.

Summary

„Using wood ash as an additional fertilizer in an aquaponic system“

Rinaldo Rütli

The aim of the study was to assess how adding wood ash to an aquaponic system would influence the growth and the quality of lettuce plants. An indoor small-scale aquaponic system was designed for this purpose and two experiments of growing plants and fish for 30 days were carried out. The first experiment was the control and the second one was to evaluate the effectiveness of wood ash as a fertilizer. The results of the two experiments were compared with each other and for additional comparison a hydroponically produced lettuce plant was used. Different parameters were analysed: plants' wet- and dryweight, chemical composition, water temperature, pH, EC, ammonia, nitrite, nitrate and potassium levels in system water.

Based on the results, plants in both experiments were substantially smaller compared to hydroponically grown plants. The reason for that might have been the overall low concentration of nutrients during the trials. The wet- and dryweight of the plants in the control experiment were higher compared to the wood ash experiment. The average wet weight of plants was $8,35 \pm 2,10$ g for the control experiment and $5,01 \pm 1,96$ g for the experiment with the wood ash. The average dry weight was $0,32 \pm 0,08$ g and $0,25 \pm 0,09$ g respectively. Plants in the control experiments were greener compared to the control, but most older leaves were wilted. although plants in the wood ash experiment had a better chemical composition regarding plant nutrients. Potassium content was nearly 50% higher than that of control. Moreover the shape of the plants was better. The cause of lower weight and chlorosis in the plants of the second experiment could be due to low iron content, which was not analysed, but is a common deficiency in aquaponic systems. This effect was amplified by the slightly higher pH level in the second experiment.

Using wood ash as a fertilizer caused some problems such as a raise in pH levels, which had to be lowered by adding acid, and small suspended ash particles in system water. Because of low potassium content a relatively large amount of wood ash had to be used. All of these problems can be dealt with by designing the system differently and using a wood ash with higher potassium content.

The goals of the study were met and the proposed hypothesis was partially confirmed because wood ash did raise the potassium content in lettuce plants. However, the hypothesis that adding wood ash could significantly increase the growth of the plants was not confirmed.

Kasutatud kirjandus

Teaduspublikatsioonid:

- Al-Maskri, A., Al-Kharusi, L., Al-Miqbali, H.** 2010. Effects of salinity stress on growth of lettuce (*Lactuca sativa*) under closed-recycle nutrient film technique. *Int. J. Agric. Biol.*, 12: 377-380.
- Al-Hafedh, Y. S., Alam, A., Beltagi, M. S.** 2008. Food production and Water Conservation in a Recirculating Aquaponic System in Saudi Arabia at Different ratios of Fish Feed to Plants. *Journal of the World Aquaculture Society*. 39. Lk 510-520.
- Andriolo, J. L., da Luz, G. L., Witter, M. H., Godoi, R. S. Barros, G. T., Bortolotto, O. C.** 2005. Growth and yield of lettuce plants under salinity. *Horticultura Brasileira*. 23. lk 931-934.
- Endut, A., Jusoh, A., Ali, N., Wan Nik, W.B., Hassan, A.** 2009 A study on the optimal hydraulic loading rate and plant ratios in recirculation aquaponic system. *Bioresource Technology*. 101. lk 1511–1517.
- Graber, A., Junge, R.** 2008. Aquaponic Systems: Nutrient recycling from fish wastewater by vegetable production. *Desalination*. 246. Lk 147-156.
- Humble, G.D., Raschke, K.** Stomatal opening quantitatively related to potassium transport. *Plant Physiol*. 48, 447-453, 1971.
- Losordo, T.M., Masser, M.P., Rakocy, J.** 1998. Recirculating Aquaculture Tank Production Systems. *SRAC Publication No.* 451.
- Mengel, K., Arneke, W.W.** Effect of potassium on the water potential, the pressure potential, the osmotic potential and cell elongation in leaves of *Phaseolus vulgaris*. *Physiol. Plant*. 54, 402-408, 1982.
- Misra, M. K., Ragland, K. W., Baker, A. J.** 1992. Wood ash composition as a function of furnace temperature. *Biomass and Bioenergy*. 4. Lk 103-116.
- Naylor, L.M., Schmidt, E. J.** 1986. Agricultural Use of Wood Ash as a Fertilizer and Liming Material. *TappiJournal*. 10. Lk 114-119.
- Pissarek, H. P.** The development of potassium deficiency symptoms in spring rape. *Z. Pflanzenernähr. Bodenk.* 136, 1-96, 1973.

- Ploeg, R. R. van der., Böhm, W., Kirkham, M. B.** 1999. On the Origin of the Theory of Mineral Nutrition of Plants and the Law of the Minimum. *Soil Science Society of America Journal*. 63. Lk 1055-1062.
- Rakocy, J.E., Masser, M.P., Losordo, T.M.** 2006. Recirculating Aquaculture Tank Production Systems: Aquaponics—Integrating Fish and Plant Culture. *SRAC Publication no.* 454.
- Rana, S., Bag, S.K., Golder, D., Mukherjee (Roy), S., Pradhan, C., Jana, B.B.** 2011. Reclamation of municipal domestic wastewater by aquaponics of tomato plants. *Ecological Engineering*. 37. Lk 981-988.
- Roosta, H.R., Hamidpour, M.** 2011. Effects of foliar application of some macro- and micro-nutrients on tomato plants in aquaponic and hydroponic systems. *Scientia Horticulturae*. 129. Lk 396–402.
- Roosta, H.R., Mohsenian, Y.** 2012. Effects of foliar spray of different Fe sources on pepper (*Capsicum annum* L.) plants in aquaponic system. *Scientia Horticulturae*. 146. Lk 182–191.
- Savidov, N. A., Hutchings, E., Rakocy, J. E.** 2007. Fish and Plant Production in a Recirculating Aquaponics System: A New Approach to Sustainable Agriculture in Canada. *Acta Hort. (ISHS)*. 742. Lk 209-221.
- Schenk, M. Wehrmann, J.** 1979. Potassium and phosphate uptake of cucumber plants at different ammonia supply. *Plant and Soil*. 52. Lk 415-426.
- Thompson, H. C., Langhans, R. W., Both, A-J., Albright, L. D.** 1998. Shoot and Root Temperature Effects on Lettuce Growth in a Floating Hydroponic System. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 123. Lk 361-364.
- Truog, E.** 1946. Soil reaction influence on availability of plant nutrients. *Soil Science Society of America Proceedings*. 11. Lk 305-308.
- Viets, F. G.** Calcium and other polyvalent cations as accelerators of ion accumulation by excised barley roots. *Plant Physiol*. 19, 466-480, 1944.
- Yorio, N. C., Goins, G. D., Kagie, H. R., Wheeler, R. M., Sager, J. C.** 2001. Improving Spinach, Radish, and Lettuce Growth under Red Light-emitting Diodes (LEDs) with Blue Light Supplementation. *HortScience* 36. Lk 380-383.

Raamatud:

- Gerber, J. M.** 1986. Plant growth and nutrient formulas, pp. 58–59 in A.J. Savage (Ed), Hydroponics Worldwide: State of the Art in Soilless Crop Production, International Center for Special Studies, Honolulu, HI. 1985.
- Jones, J.B.Jr.** 2005. Hydroponics : a practical guide for the soilless grower. CRC Press. USA. 440 lk.
- Kandeler, E.** 1996. Ammonium. In: Schinner, F., Öhlinger, R., Kandeler, E., Margesin, R. (Eds.), Methods in soil biology. Springer-Verlag. Berlin. lk 95-98.
- Kärblane, H., Kanger, J., Kevvai, L., Kevvai, T., Kuldkepp, P., Raudväli, E., Turbas, E.** 1996. Taimede toitumise ja väetamise käsiraamat. EV Põllumajandusministeerium. Tallinn. 285 lk.
- Mengel, K., Kirkby, E.A.** 2001. Principles of plant nutrition 5th edition. Kluwer Academic Publishers. Dordrecht. 849 lk.
- Molyneux, C. J.** 1988. A Practical Guide to NFT. T. Snap & Co Ltd., Preston, Lancashire, England. 153 lk.
- Paaver, T., Kasesalu, J., Gross, R., Puhk, M., Tohvert, T., Liiv, A., Aid, M.** 2006. Kalakasvatus ja tervishoid. Halo Kirjastus. Tartu. 191 lk.
- Parker, R.** 2012. Aquaculture Science. Cengage Learning. USA. 672 lk.
- Raviv, M., Lieth, J. H.** 2008. Soilless culture: theory and practice. Elsevier BV. USA. 608 lk.
- Resh, H. M.** 2004. Hydroponic food production: a definitive guidebook of soilless food-growing methods. Newconcept Press, Inc. USA. 567 lk.
- Winterborne, J.** 2005. Hydroponics: Indoor Horticulture. Pukka Press. UK. 258 lk.

Internetiallikad:

The Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). 2010b. World aquaculture production of fish, crustaceans, molluscs, etc., by principal species in 2010. <ftp://ftp.fao.org/FI/STAT/summary/a-6.pdf> (2.05.2015)

The Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). 2010a. World aquaculture production by species groups. <ftp://ftp.fao.org/FI/STAT/summary/b-1.pdf> (2.05.2015)

Helfrich, L.A., Libey, G. 2003. Fish farming in recirculating aquaculture systems. http://www.extension.org/mediawiki/files/5/5c/Fish_Farming_in_Recirculating_Aquaculture_Systems.pdf (2.05.2015)

Rehm, G, Schmitt, M. 2002. Potassium for crop production. <http://www.extension.umn.edu/agriculture/nutrient-management/potassium/potassium-for-crop-production> (2.05. 2015)

Statistikaamet. www.stat.ee (2.05.2015)

Muud publikatsioonid ja projektid:

Boyd, C.E. 2001. Water Quality Standards: Biochemical Oxygen Demand. The Advocate October. Lk 71-72.

Bregnballe, J. 2010. A Guide to Recirculation Aquaculture: An introduction to the new environmentally friendly and highly productive closed fish farming systems. Copenhagen.

Civitta. 2014. Eesti aianduse arengut piiravad tegurid ja Eesti aiandusvaldkonna võimalikud arengueeldused.

Currey, C. J., Lopez, R. G. 2013. Comparing LED lighting to High-Pressure Sodium Lamps. Greenhouse Grower. October 2013. lk 34-40.

Diver, S. 2006. Aquaponics—Integration of Hydroponics with Aquaculture. ATTRA. 28 lk.

Eesti Konjunkturiinstituut. 2014. Kala ja kalatoodete turg Eestis. Tallinn.

Lennard, W. 2010. A New Look at NFT Aquaponics. Aquaponics Journal. 56. Lk 16-19.

Morard, P. Contribution to the study of the potassium nutrition of sorghum. Ph. D. Thesis, University Toulouse. 1973.

Tomingas, M., Jaanuska, H., Tenno, T. 2012. Kalakasvatuste veesaaste arvestusmetoodika väljatöötamine.

Põllumajandusministeerium. 2014. Eesti maaelu arengukava 2014-2020.

Põllumajandusministeerium. 2015. Eesti aiandussktori arengukava aastateks 2015-2020.

Rakocy, J. E., Shultz, R. C., Bailey, D. S., Thoman, E. S. 2004. Aquaponic Production of Tilapia and Basil: Comparing a batch and Staggered Cropping system. University of the Virgin Islands.

Rakocy, J. E. 2007. Ten Guidelines for Aquaponic Systems. Aquaponics Journal. 46. Lk 14-17.

Tallinna Ülikool, Eesti Maaülikool. 2013. Eesti vesiviljeluse sektori arengustrateegia 2014-2020. Tallinn, Tartu.